

(11)特許出願公開番号  
特開2000-98433  
(P2000-98433A)

(43)公開日 平成12年4月7日(2000.4.7)

(51)Int.Cl. <sup>7</sup>		識別記号	F I		テマコード <sup>*</sup> (参考)
G 0 2 F	1/35	5 0 1	G 0 2 F	1/35	5 0 1
H 0 1 S	5/026		H 0 1 S	3/18	6 1 6
	3/30			3/30	Z
H 0 4 B	10/17		H 0 4 B	9/00	J
	10/16				

審査請求 未請求 請求項の数35 O.L (全 24 頁)

(21)出願番号 特願平11-34833

(22)出願日 平成11年2月12日(1999.2.12)

(31)優先權主張番号 特願平10-208450

(32)優先日 平成10年7月23日(1998.7.23)

(33)優先権主張国 日本 (J P)

(71)出願人 000005290

古河電気工業株式会社

東京都千代田区丸の内2丁目6番1号

(72)發明者 江森 芳博

東京都千代田区丸の内2丁目6番1号 古  
河電気工業株式会社内

(72)発明者 赤坂 洋一

東京都千代田区丸の内2丁目6番1号 古河電気工業株式会社内

(72)發明者 並木 周

東京都千代田区丸の内2丁目6番1号 古  
河電気工業株式会社内

(74) 代理人 100076369

弁理士 小林 正治

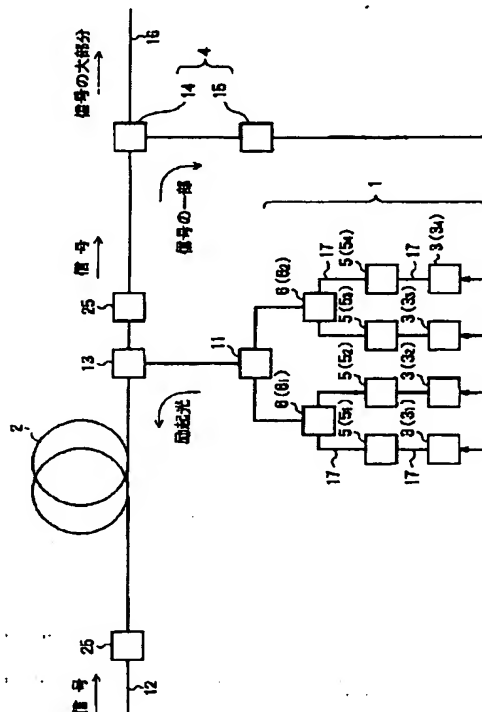
**BEST AVAILABLE COPY**

(54) 【発明の名称】 ラマン増幅器とそれを用いた光中継器

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 必要な利得を得ることができ、利得平坦化フィルタを使用する必要がない程度に利得の波長依存性を小さくすることができ、EDFAの帯域でも使用することができるラマン増幅器を提供する。

【解決手段】 半導体レーザ3はファブリペロー型のものでファイバグレーティング等の発振波長安定化用の外部共振器が接続されたものを使用する。又レーザの中心波長の間隔が6nm 以上35nm以下、中心波長の最大値と最小値の差は100nm 以内とする。各励起光の出力パワーを検出する手段又は各励起光源による利得が最大となる波長の信号光出力パワーを検出する手段を持ち、パワーを一定値に保つよう各励起光源の駆動電流を制御する手段4を持つ。中継器へ応用する場合は中継器の信号波長帯よりも約100nm 短い波長帯の励起光を光中継器の構成要素となっているDCF に入射する手段をもつ。増幅器1 とDCF 入力の間と増幅器2 とDCF 出力の間に信号光をモニタする手段や励起光のパワーを調節する手段等をもつ。



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】複数の励起光を発生する励起光発生手段

(1) を備え、同励起光発生手段 (1) から出力される複数の励起光と光ファイバ (2) に伝播される信号光とを合波して当該信号光にラマン利得を与えるラマン増幅器であって、前記励起光発生手段 (1) はファブリペロー型、DFB 型、DBR 型の半導体レーザ又は MOPA (3) を用いて構成し、各励起光はその中心波長を互いに異なるものとし、且つ中心波長の間隔を 6nm 以上 35nm 以下とすることを特徴とするラマン増幅器。

【請求項 2】複数の励起光は中心波長が最大のものと最小のものとの波長の差を 100nm 以内とすることを特徴とする請求項 1 に記載のラマン増幅器。

【請求項 3】励起光発生手段 (1) は隣り合う波長の励起光を光ファイバ (2) に互いに異なる 2 方向に伝播して信号光を双方向励起する構成であることを特徴とする請求項 1 又は請求項 2 に記載のラマン増幅器。

【請求項 4】励起光発生手段 (1) は複数の励起光を 2 つのグループに分けて配置すると共に、同一グループ内に隣接波長の励起光が入らない様にして夫々のグループ内で励起光を合波する構成とし、グループ内で合波された 2 つの励起光を光ファイバ (2) に互いに異なる 2 方向に伝播する様にしたことを特徴とする請求項 3 に記載のラマン増幅器。

【請求項 5】入力光又は出力光をモニタし、その結果に基づいて励起光発生手段 (1) の各励起光パワーを制御して、出力光パワーを所定値に保つ出力光パワー制御手段 (4) を備えることを特徴とする請求項 1 乃至請求項 4 のいずれかに記載のラマン増幅器。

【請求項 6】出力光をモニタし、その結果に基づいて励起光発生手段 (1) の各励起光パワーを制御して、増幅器出力の波長依存性を平坦化する出力光パワー制御手段 (4) を備えることを特徴する請求項 1 乃至請求項 5 のいずれかに記載のラマン増幅器。

【請求項 7】出力光パワー制御手段 (4) は、出力光から分岐したモニタ光を各励起光の波長に各々約 100nm を加えた波長の波長光に分波してそれら波長光をモニタし、各波長光のパワーを揃える様に励起光発生手段

(1) の各励起光パワーを制御するものであることを特徴とする請求項 5 又は請求項 6 に記載のラマン増幅器。

【請求項 8】出力光パワー制御手段 (4) は、出力光から分岐したモニタ光を更に励起光と同数に分配して、それらから各励起光の波長に各々約 100nm を加えた波長光を透過させて各波長光をモニタし、各波長光のパワーを揃える様に励起光発生手段 (1) の各励起光パワーを制御するものであることを特徴とする請求項 5 又は請求項 6 に記載のラマン増幅器。

【請求項 9】入力光パワーと出力光パワーとをモニタし、それらの比が一定になる様に励起光発生手段 (1) の各励起光パワーを制御して、利得を所定値に保つ出力

光パワー制御手段 (4) を備えることを特徴とする請求項 1 乃至請求項 8 のいずれかに記載のラマン増幅器。

【請求項 10】励起光発生手段 (1) はファブリペロー型の半導体レーザ (3) の出力側にファイバグレーティング等の波長安定化用の外部共振器 (5) を設けて構成することを特徴とする請求項 1 乃至請求項 9 のいずれかに記載のラマン増幅器。

【請求項 11】励起光発生手段 (1) はファブリペロー型の半導体レーザ (3) の出力側に励起光を偏波合成するための偏波合成器 (6) を設けて構成することを特徴とした請求項 1 乃至請求項 10 のいずれかに記載のラマン増幅器。

【請求項 12】励起光発生手段 (1) は、マッハツェンダ干渉計を原理とする平面光波回路型波長合波器を設けて構成することを特徴とする請求項 1 乃至請求項 11 のいずれかに記載のラマン増幅器。

【請求項 13】偏波面を 90 度回転する偏波面回転手段 (7) を備え、光ファイバ (2) に励起光発生手段 (1) で発生された複数の励起光と前記偏波面回転手段 (7) により偏波面が 90 度回転された前記各励起光と偏波面が直交される励起光とが同時に存在する様にしたことを特徴とする請求項 1 乃至請求項 12 のいずれかに記載のラマン増幅器。

【請求項 14】増幅用の光ファイバ (2) は非線形屈折率  $n_2$  が  $3.5 \times 10^{-20} [\text{m}^2 / \text{W}]$  以上であることを特徴とする請求項 1 乃至請求項 13 のいずれかに記載のラマン増幅器。

【請求項 15】増幅用の光ファイバ (2) が伝送路の一部として存在するものであることを特徴とする請求項 1 乃至請求項 14 のいずれかに記載のラマン増幅器。

【請求項 16】増幅用のファイバ (2) として SMF と  $-20 [\text{ps}/\text{nm}/\text{km}]$  未満の分散を持つファイバを用いることを特徴とする請求項 1 乃至請求項 15 のいずれかに記載のラマン増幅器。

【請求項 17】請求項 16 に記載のラマン増幅器において、 $-20 [\text{ps}/\text{nm}/\text{km}]$  未満の分散を持つファイバから SMF へ向って励起光が伝播することを特徴とするラマン増幅器。

【請求項 18】増幅用の光ファイバ (2) が信号光を伝播するための伝送用ファイバから独立したものであり、同伝送用ファイバ中に挿入可能なラマン増幅用ファイバとして存在するものであることを特徴とする請求項 1 乃至請求項 14 のいずれかに記載のラマン増幅器。

【請求項 19】光ファイバ伝送路 (8) 中に挿入されて同光ファイバ伝送路 (8) における損失を補償する光中継器であって、請求項 1 乃至請求項 18 のいずれかに記載のラマン増幅器 (9) を備え、同ラマン増幅器 (9) で光ファイバ伝送路 (8) における損失を補償することを特徴とする光中継器。

【請求項 20】請求項 19 に記載の光中継器において、

10

20

30

40

50

ラマン増幅器 (9) の残留励起光を光ファイバ伝送路 (8) に入射し、光ファイバ伝送路 (8) におけるラマン増幅効果を利用することを特徴とする光中継器。

【請求項 21】請求項 19 に記載の光中継器において、ラマン増幅器 (9) の前段又は後段又は前後両段に希土類添加ファイバ増幅器 (10) を備えることを特徴とする光中継器。

【請求項 22】請求項 21 に記載の光中継器において、ラマン増幅器 (9) の残留励起光を希土類添加ファイバ増幅器 (10) の励起光として利用することを特徴とする光中継器。

【請求項 23】光ファイバ伝送路 (8) 中に挿入されて同光ファイバ伝送路 (8) における波長分散を補償する光中継器であって、請求項 1 乃至請求項 18 のいずれかに記載のラマン増幅器 (9) を備え、その光ファイバ (2) に分散補償用ファイバを用いて光ファイバ伝送路 (8) における波長分散を補償し、光ファイバ伝送路 (8) 及び光ファイバ (2) における損失の一部又は全てを補償することを特徴とする光中継器。

【請求項 24】請求項 23 に記載の光中継器において、ラマン増幅器 (9) の残留励起光を光ファイバ伝送路 (8) に入射し、光ファイバ伝送路 (8) におけるラマン増幅効果を利用することを特徴とする請求項 21 に記載の光中継器。

【請求項 25】請求項 23 に記載の光中継器において、ラマン増幅器 (9) の前段又は後段又は前後両段に希土類添加ファイバ増幅器 (10) を備えることを特徴とする光中継器。

【請求項 26】請求項 25 に記載の光中継器において、ラマン増幅器の残留励起光を希土類添加ファイバ増幅器 (10) の励起光として利用することを特徴とする光中継器。

【請求項 27】分散補償用ファイバである光ファイバ (2) への入力レベルの変動や同ファイバ (2) における損失の変動を同光ファイバ (2) におけるラマン増幅により補償して、当該光ファイバ (2) からの出力を所定値に保つ制御手段を備えることを特徴とする請求項 23 乃至請求項 26 のいずれかに記載の光中継器。

【請求項 28】分散補償用ファイバである光ファイバ (2) における損失又は利得を同光ファイバ (2) におけるラマン増幅により補償して一定に保つ制御手段を備えることを特徴とする請求項 23 乃至請求項 26 のいずれかに記載の光中継器。

【請求項 29】希土類添加ファイバ増幅器 (10) の利得を一定に保ち、ラマン増幅器 (9) の利得によって中継器の利得を調整する様にしたことを特徴とする請求項 21、22、25、26、27、28 のいずれかに記載の光中継器。

【請求項 30】希土類添加ファイバ増幅器 (10) の利得の波長依存性をラマン増幅器 (9) の利得の波長依存

性を使って補償する様にしたことを特徴とする請求項 21、22、25、26、27、28、29 のいずれかに記載の光中継器。

【請求項 31】光ファイバ伝送路 (8) 中に挿入されて同光ファイバ伝送路 (8) における損失と波長分散を補償する光中継器であって、励起光の波長が単一であるラマン増幅器 (9) を備え、同ラマン増幅器 (9) の前段又は後段又は前後両段に希土類添加ファイバ増幅器 (10) を備えることを特徴とし、ラマン増幅器 (9) の増幅用の光ファイバ (2) に分散補償用ファイバを用いることを特徴とする光中継器。

【請求項 32】請求項 31 に記載の光中継器において、ラマン増幅器 (9) の残留励起光を希土類添加ファイバ増幅器 (10) の励起光として利用することを特徴とする光中継器。

【請求項 33】請求項 31 又は請求項 32 に記載の光中継器において、分散補償用ファイバであるラマン増幅用の光ファイバ (2) への入力レベルの変動や同ファイバ (2) における損失変動を同ファイバ (2) におけるラマン増幅により補償して、当該光ファイバ (2) からの出力を所定値に保つ制御手段を備えることを特徴とする光中継器。

【請求項 34】請求項 31 又は請求項 32 に記載の光中継器において、分散補償用ファイバであるラマン増幅用の光ファイバ (2) における損失又は利得を同ファイバ (2) におけるラマン増幅により補償して所定値に保つ制御手段を備えることを特徴とする光中継器。

【請求項 35】請求項 31 又は請求項 32 に記載の光中継器において、希土類添加ファイバ増幅器 (10) の利得を一定に保ち、ラマン増幅器 (9) の利得によって中継器の利得を調整する様にしたことを特徴とする光中継器。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は各種光通信システムで信号光の増幅に使うことができるラマン増幅器とそれを用いた光中継器に関するものであり、特に波長分割多重光の増幅に適するものである。

【0002】

【従来の技術】現在の光ファイバ通信システムで使用される光増幅器のほとんどは、希土類添加ファイバ増幅器である。特にEr (エルビウム) を添加したファイバを使用するEr添加光ファイバ増幅器 (以下、EDFAと記載する) がよく用いられる。しかし、EDFAの実用的な利得波長帯は1530nmから1610nm程度である。(参考文献: Electron. Lett., vol. 33, no. 23, pp. 1967 - 1968) また、EDFAは利得に波長依存性を持っており、波長分割多重光に用いる場合、信号光の波長によって利得に差が出る。図23はEDFAの利得波長依存性の一例を示したものであるが、1540nm以下と1560nm以上では特に波長に対する利

得の変化が大きい。従って、そのような波長を含む帯域全体で一定の利得（大抵は利得偏差1dB 以内）を得るには、利得平坦化フィルタを使用する。

【0003】利得平坦化フィルタは利得が大きい波長の所で損失が大きくなるように設計されたフィルタであり、損失プロファイルは利得プロファイルとほぼ同じ形をしている。但し、EDFAは図24に示す様に平均利得の大きさが変化すると曲線a、b、cの様に利得プロファイルも変わるので、この場合、最適な利得平坦化フィルタの損失プロファイルも変わる。従って、損失プロファイルが固定的な利得補正フィルタによって平坦化が実現されている場合には、EDFAの利得が変化すると平坦度が劣化してしまう。

【0004】一方、光増幅器には光ファイバのラマン散乱を利用したラマン増幅器と呼ばれるものもある（参考文献：Nonlinear Fiber optics, Academic Press）。ラマン増幅器は励起光の周波数よりも約13THz 低い周波数に利得のピークを持つ。以下の記述では、1400nm帯の励起光を使用した場合を前提とし、約13THz 低い周波数を約100nm 長い波長と表現する。図25に中心波長が1450nmの励起光を用いたときの利得の波長依存性を示す。このとき利得のピークは1550nmであり、利得偏差1dB 以内の帯域幅は20nm程度である。ラマン増幅器は励起光源さえ用意できれば、任意の波長を増幅することができるため、EDFAで増幅する事のできない波長帯での使用が主に検討されている。その一方、ラマン増幅器はEDFAの利得帯域では用いられていない。これはラマン増幅器がEDFAと同等の利得を得るためにより大きい励起光パワーを必要とするためである。加えて、大きなパワーの励起光をファイバに入射して利得を高めようすると、励起光による誘導ブリルアン散乱が発生して雑音が増えるため、ラマン増幅器の利用を難しくしている。特開平2-12986号公報にはラマン増幅器での誘導ブリルアン散乱を抑制する技術の一例が開示されている。

【0005】また、ラマン増幅器は利得に偏波依存性を有し、信号光に含まれる偏波成分の中で励起光の偏波と一致する成分に対してのみ増幅作用をもたらす。従って、偏波依存性による利得の不安定性を低減する対策が求められるが、これには、増幅用ファイバとして偏波面を保存するファイバを用いるか、偏波状態がランダムな励起光源を用いることが考えられている。

【0006】この他、ラマン増幅器は利得帯域の拡大も必要とされており、この方法として、波長の異なる複数の励起光を利用することが考えられている（参考文献：OFC98, PD-6）。しかしながら、利得偏差を1dB 以下にするという観点での取り組みはなされていない。

【0007】他方、光ファイバ伝送路において発生する伝送損失と波長分散を同時に補償する光中継器もあり、これはEr添加ファイバ増幅器（EDFA）と波長分散を補償するための分散補償用ファイバ（DCF）を組み合わせた

構成である。図46はこの従来例であり、分散補償用ファイバAが2つのEr添加ファイバ増幅器B、Cで挟まれた構成となっている。第1のEr添加ファイバ増幅器Bは低レベルの信号光を比較的高いレベルに増幅するものであり、雑音特性に優れていることを特徴としている。第2のEr添加ファイバ増幅器Cは分散補償ファイバAにおいて減衰した光信号を再び高いレベルに増幅するものであり、出力レベルが高いことを特徴としている。

【0008】ところで前記光中継器は、その設計に際して、中継器入力レベル、中継器出力レベル、分散補償量（分散補償用ファイバAにおける損失）の各々を適切に設定する必要があり、また、分散補償用ファイバAの入力光レベルに上限値が存在するという制限項目もある。これは、分散補償用ファイバAへの入力パワーを大きくすると、分散補償用ファイバA中での非線形効果の影響が大きくなり、伝送波形の劣化が著しくなることによる。この分散補償用ファイバAへの入力パワーの上限値は、1波伝送時には自己位相変調（SPM）効果、WDM 伝送時には相互位相変調（XPM）効果が決定要因となっている。以上、光中継器ではいくつかの変動要因を考慮して、その条件下で利得平坦度と雑音特性に優れた中継器を設計しなければならない。

【0009】図47は中継器内部における光レベルダイアグラムを示したものである。第1のEr添加ファイバ増幅器Bの利得 $G1$  [dB] は、中継器入力レベル $Pin$  [dB]と分散補償用ファイバAへの入力上限値 $Pd$  [dB] の差に設定される。第2のEr添加ファイバ増幅器Cの利得 $G2$  [dB] は、分散補償用ファイバAにおける損失 $Ld$  [dB]と、中継器利得 $Gr$  [dB] と、第1のEr添加ファイバ増幅器Bの利得 $G1$  [dB] とから $Gr+Ld-G1$  [dB] に設定される。これらの設計パラメータはシステム毎に異なるため、システム毎に $G1$  [dB]、 $G2$  [dB] は異なり、従って、Er添加ファイバ増幅器B、Cはシステム毎に再設計する必要がある。このようなシステムにおける雑音特性は、分散補償用ファイバAにおける損失 $Ld$  [dB] と深い関係があり、損失が大きい程、雑音特性が悪くなることが知られている。また、現在は伝送路の損失や分散補償用ファイバAの損失のばらつきを、Er添加ファイバ増幅器BやCの利得を変化させて補償したり、別途可変減衰器等を設けて調整しているが、前者は利得平坦度を劣化させ、後者は雑音特性を劣化させるため一長一短がある。

#### 【0010】

【発明が解決しようとする課題】光ファイバ通信ではEr添加光ファイバ増幅器が普及しているが、Er添加光ファイバ増幅器にもいくつかの課題がある。また、ラマン増幅器も一般的な半導体レーザの出力が100 から200mW 程度であり、得られる利得は比較的小さいとか、利得が励起光のパワーや波長の変化に敏感であり、比較的高出力のファブリペロー型の半導体レーザを用いる場合には、



そのモードホップが引き起こす利得変動による雑音が顕著となるとか、利得の大きさを調整する際に、励起レーザの駆動電流を変化させる必要があるが、駆動電流を変化させた場合の中心波長の変動は最大15nm程度あり、利得の波長依存性が大きく変わってしまうとかいった課題がある。また、このような中心波長のシフトは励起光を多重化するWDM カプラの結合損失の変化にもつながるので好ましくない課題がある。更に、光中継器もシステム毎にEr添加ファイバ増幅器B、Cを設計しなおす必要がある等課題がある。また、分散補償用ファイバを挿入することによる雑音特性の劣化は、現行の方式では、避け

#### 【0011】

【課題を解決するための手段】本発明の目的は、必要な利得を得ることができ、利得平坦化フィルタを使用する必要がない程度に利得の波長依存性を小さくすることができ、EDFAの帯域でも使用することができるラマン増幅器を提供することであり、また、このラマン増幅器をEr添加ファイバ増幅器(EDFA)と分散補償用光ファイバ(DCF)で構成される光中継器に応用して、システム毎にEDFAを再設計する必要がなく、光中継器の特性を劣化させることもなく、伝送路損失やDCF損失のばらつきを補償することもできる光中継器を提供する。また、DCFをラマン増幅することは、従来避けることのできなかつたDCF挿入に起因する雑音特性の劣化を軽減することを示す。

【0012】本発明のうち請求項1記載のラマン増幅器は図1又は図2又は図3に示す様に、複数の励起光を発生する励起光発生手段1を備え、同励起光発生手段1から出力される複数の励起光と光ファイバ2に伝播される信号光とを合波して当該信号光にラマン利得を与えるラマン増幅器であって、前記励起光発生手段1はファブリペロー型、DFB型、DBR型の半導体レーザ又はMOPA3を用いて構成し、各励起光はその中心波長を互いに異なるものとし、且つ中心波長の間隔を6nm以上35nm以下とすることを特徴とするものである。

【0013】本発明のうち請求項2記載のラマン増幅器は、複数の励起光は中心波長が最大のものと最小のものととの波長の差を100nm以内とすることを特徴とするものである。

【0014】本発明のうち請求項3記載のラマン増幅器は図3に示す様に、励起光発生手段1は隣り合う波長の励起光を光ファイバ2に互いに異なる2方向に伝播して信号光を双方向励起する構成であることを特徴とするものである。

【0015】本発明のうち請求項4記載のラマン増幅器は図3に示す様に、励起光発生手段1は複数の励起光を2つのグループに分けて配置すると共に、同一グループ内に隣接波長の励起光が入らない様にして夫々のグループ内で励起光を合波する構成とし、グループ内で合波さ

れた2つの励起光を光ファイバ2に互いに異なる2方向に伝播する様にしたことを特徴とするものである。

【0016】本発明のうち請求項5記載のラマン増幅器は図26又は図27に示す様に、入力光又は出力光をモニタし、その結果に基づいて励起光発生手段1の各励起光パワーを制御して、出力光パワーを所定値に保つ出力光パワー制御手段4を備えることを特徴とするものである。

【0017】本発明のうち請求項6記載のラマン増幅器は図4又は図5に示す様に、ラマン利得を受けた信号光を含む出力光をモニタし、その結果に基づいて励起光発生手段1の各励起光パワーを制御して、増幅器出力の波長依存性を平坦化する出力光パワー制御手段4を備えることを特徴とするものである。

【0018】本発明のうち請求項7記載のラマン増幅器は図4に示す様に、出力光パワー制御手段4は、出力光から分岐したモニタ光を各励起光の波長に各々約100nmを加えた波長の波長光に分波してそれら波長光をモニタし、各波長光のパワーを揃える様に励起光発生手段1の各励起光パワーを制御するものであることを特徴とするものである。

【0019】本発明のうち請求項8記載のラマン増幅器は図5に示す様に、出力光パワー制御手段4は、出力光から分岐したモニタ光を更に励起光と同数に分配して、それらから各励起光の波長に各々約100nmを加えた波長光を透過させて各波長光をモニタし、各波長光のパワーを揃える様に励起光発生手段1の各励起光パワーを制御するものであることを特徴とするものである。

【0020】本発明のうち請求項9記載のラマン増幅器は図28に示す様に、入力光パワーと出力光パワーとをモニタし、それらの比が一定になる様に励起光発生手段1の各励起光パワーを制御して、利得を所定値に保つ出力光パワー制御手段4を備えることを特徴とするものである。

【0021】本発明のうち請求項10記載のラマン増幅器は図1又は図2又は図3に示す様に、励起光発生手段1はファブリペロー型の半導体レーザ3の出力側にファイバグレーティング等の波長安定化用の外部共振器5を設けて構成することを特徴とするものである。

【0022】本発明のうち請求項11記載のラマン増幅器は図1又は図2又は図3に示す様に、励起光発生手段1はファブリペロー型の半導体レーザ3の出力側に励起光を偏波合成するための偏波合成器6を設けて構成することを特徴としたものである。

【0023】本発明のうち請求項12記載のラマン増幅器は図1又は図2又は図3に示す様に、励起光発生手段1は複数の波長のファブリペロー型、DFB型、DBR型の半導体レーザ又はMOPAをマッハツェンダ干渉計を原理とする平面光波回路型波長合波器を設けて構成することを特徴とするものである。

【0024】本発明のうち請求項13記載のラマン増幅器は図6(a)又は図6(b)に示す様に、偏波面を90度回転する偏波面回転手段7を備え、光ファイバ2に励起光発生手段1で発生された複数の励起光と前記偏波面回転手段7により発生された前記各励起光と偏波面が直交する励起光とが同時に存在する様にすることを特徴とするものである。

【0025】本発明のうち請求項14記載のラマン増幅器は、増幅用の光ファイバ2は非線形屈折率 $n_2$ が $3.5E-20$  [m<sup>2</sup>/W] 以上であることを特徴とするものである。

【0026】本発明のうち請求項15記載のラマン増幅器は、増幅用の光ファイバ2が伝送路の一部として存在するものであることを特徴とするものである。

【0027】本発明のうち請求項16に記載のラマン増幅器は増幅用ファイバ2が伝送路となっており、その内訳がSMFと $-20\text{ps/nm/km}$ 未満の分散を持つファイバを接続して構成されたものであることを特徴とするものである。

【0028】本発明のうち請求項17に記載のラマン増幅器は増幅用ファイバ2が伝送路となっており、その内訳がSMFと $-20\text{ps/nm/km}$ 未満の分散を持つファイバを接続して構成されたものであり、 $-20\text{ps/nm/km}$ 未満の分散を持つファイバからSMFへ向って励起光が伝播することを特徴とするものである。

【0029】本発明のうち請求項18記載のラマン増幅器は、増幅用の光ファイバ2が信号光を伝播するための伝送用ファイバから独立したものであり、同伝送用ファイバ中に挿入可能なラマン増幅用ファイバとして存在するものであることを特徴とするものである。

【0030】本発明のうち請求項19記載の光中継器は図7に示す様に、光ファイバ伝送路8中に挿入されて同光ファイバ伝送路8における損失を補償する光中継器であって、請求項1乃至請求項14のいずれかに記載のラマン増幅器9を備え、同ラマン増幅器9で光ファイバ伝送路8における損失を補償する構成であることを特徴とするものである。

【0031】本発明のうち請求項20に記載の光中継器は図29～図32に示す様に、ラマン増幅器9の残留励起光を光ファイバ伝送路8に入射し、光ファイバ伝送路8におけるラマン増幅効果を利用することを特徴とするものである。

【0032】本発明のうち請求項21記載の光中継器は図8に示す様に、ラマン増幅器9の前段又は後段又は前後両段に希土類添加ファイバ増幅器10を備えることを特徴とするものである。

【0033】本発明のうち請求項22記載の光中継器は図33～図36に示す様に、ラマン増幅器9の残留励起光を希土類添加ファイバ増幅器10の励起光として利用することを特徴とするものである。

【0034】本発明のうち請求項23記載の光中継器は

図45に示す様に、光ファイバ伝送路8中に挿入されて同光ファイバ伝送路8における波長分散を補償する光中継器であって、請求項1乃至請求項14のいずれかに記載のラマン増幅器9を備え、その光ファイバ2に分散補償用ファイバを用いて光ファイバ伝送路8における波長分散を補償し、光ファイバ伝送路8及び増幅用の光ファイバ2における損失の一部又は全てを補償することを特徴とするものである。

【0035】本発明のうち請求項24に記載の光中継器は図29～図32に示す様に、ラマン増幅器9の残留励起光を光ファイバ伝送路8に入射し、光ファイバ伝送路8におけるラマン増幅効果を利用することを特徴とするものである。

【0036】本発明のうち請求項25記載の光中継器は図8に示す様に、ラマン増幅器9の前段又は後段又は前後両段に希土類添加ファイバ増幅器10を備えることを特徴とするものである。

【0037】本発明のうち請求項26記載の光中継器は図33～図36に示す様に、ラマン増幅器9の残留励起光を希土類添加ファイバ増幅器10の励起光として利用することを特徴とするものである。

【0038】本発明のうち請求項27記載の光中継器は図9に示す様に、分散補償用ファイバである光ファイバ2への入力レベルの変動や同ファイバ2における損失の変動を同光ファイバ2におけるラマン増幅により補償して、当該光ファイバ2からの出力を所定値に保つ制御手段を備えることを特徴とするものである。

【0039】本発明のうち請求項28記載の光中継器は図10に示す様に、分散補償用ファイバである光ファイバ2における損失又は利得を同光ファイバ2におけるラマン増幅により補償して一定に保つ制御手段を備えることを特徴とするものである。

【0040】本発明のうち請求項29記載の光中継器は、希土類添加ファイバ増幅器10の利得を一定に保ち、ラマン増幅器9の利得によって中継器の利得を調整する様にすることを特徴とするものである。

【0041】本発明のうち請求項30記載の光中継器は図11に示す様に、希土類添加ファイバ増幅器10の利得の波長依存性をラマン増幅器9の利得の波長依存性を使って補償する様にすることを特徴とするものである。

【0042】本発明のうち請求項31記載の光中継器は図8に示す様に、光ファイバ伝送路8中に挿入されて同光ファイバ伝送路8における損失と波長分散を補償する光中継器であって、励起光の波長が単一であるラマン増幅器9を備え、同ラマン増幅器9の前段又は後段又は前後両段に希土類添加ファイバ増幅器10を備えることを特徴とし、ラマン増幅器9の増幅用の光ファイバ2に分散補償用ファイバを用いることを特徴とするものである。

【0043】本発明のうち請求項32記載の光中継器は

図 3 3 ~ 図 3 6 に示す様に、ラマン増幅器 9 の残留励起光を希土類添加ファイバ増幅器 10 の励起光として利用することを特徴とするものである。

【0044】本発明のうち請求項 33 に記載の光中継器は図 9 に示す様に、分散補償用ファイバであるラマン増幅用の光ファイバ 2 への入力レベルの変動や同ファイバ 2 における損失変動を同ファイバ 2 におけるラマン増幅により補償して、当該光ファイバ 2 からの出力を所定値に保つ制御手段を備えることを特徴とするものである。

【0045】本発明のうち請求項 34 に記載の光中継器は図 10 に示す様に、分散補償用ファイバであるラマン増幅用の光ファイバ 2 における損失又は利得を同ファイバ 2 におけるラマン増幅により補償して所定値に保つ制御手段を備えることを特徴とするものである。

【0046】本発明のうち請求項 35 に記載の光中継器は図 11 に示す様に、希土類添加ファイバ増幅器 10 の利得を一定に保ち、ラマン増幅器 9 の利得によって中継器の利得を調整する様にしたことを特徴とするものである。

【0047】次に本発明のラマン増幅器とそれを用いた光中継器の作用について説明する。本発明のうち請求項 1 記載のラマン増幅器では図 1、2、3 に示す様に、励起光発生手段 1 に小型で比較的高出力のファブリペロー型の半導体レーザ 3 を用いた場合、比較的高い利得を得ることができ、また、ファブリペロー型の半導体レーザ 3 は発振波長の線幅が広いと、励起光による誘導ブリルアン散乱の発生をほぼなくすることができる。DBF 型、DBR 型の半導体レーザ又は MOPA を用いた場合、発振波長の変動範囲が比較的小さいと、利得形状が駆動条件によって変化することがない。また、誘導ブリルアン散乱の発生は変調をかけることにより抑制することができる。

【0048】更に、励起光を中心波長の間隔を 6nm 以上 35nm 以下とすることにより利得平坦化フィルタを必要としない程度に利得の波長依存性を小さくすることができる。励起光の中心波長間隔を 6nm 以上とする理由は、反射帯域幅の狭い外部共振器 5 を接続したファブリペロー型の半導体レーザ 3 の発振帯域幅が図 12 に示す様に約 3nm であることと、励起光を合波するための WDM カブラ 11 (図 1、2、3) に合波効率を良くするために励起光間の波長間隔にいくらかの余裕をもたせることを可能にするためである。WDM カブラ 11 は、異なる波長の光を別々のポートから入射し、入射光がほとんど損失を受けることなく 1 つの出力ポートへ結合するように設計されたものであるが、設計波長の中間の波長の光に対しては、どちらの入力ポートを使用しても損失が大きくなる。例えば、ある WDM カブラ 11 ではこの損失が大きくなる波長帯域の幅が 3nm であった。従って、この帯域内に半導体レーザ 3 の帯域が含まれないようにするためには、図 12 に示す様に半導体レーザ 3 の帯域幅に 3nm を

加えた 6nm が励起光の中心波長間隔の下限として適切である。一方、図 13 (a) の様に半導体レーザ 3 の中心波長の間隔を 35nm 以上とすると、図 13 (b) の様に隣り合う波長の励起光によって得られるラマン利得帯域の中間に利得の谷ができ、利得平坦度が悪くなる。これは、1 つの励起光によって得られるラマン利得に関して、利得ピーク波長から 15nm から 20nm 離れると利得が半分になることに起因する。従って、励起光の中心波長の間隔を 6nm 以上 35nm 以下とすることで、利得平坦化フィルタを使用する必要がない程度に利得の波長依存性を小さくすることができる。

【0049】本発明のうち請求項 2 記載のラマン増幅器では、励起光の中心波長の最大値と最小値の差を 100nm 以内とするため、励起光と信号光との波長の重複を防止して信号光の波形劣化を防止することができる。励起光と信号光の波長が近いと信号光の波形劣化につながるため、励起光と信号光の波長は重複しないように選ばなければならないが、励起光が 1.4  $\mu\text{m}$  帯の場合には、励起光の中心波長の最大値と最小値の差を 100nm 以下とすると、図 14 に示す様に 1 つの励起光から生じる利得の中心波長とその励起光との波長の差は約 100nm であるため、励起光と信号光との波長の重複を防止することができる。

【0050】本発明のうち請求項 3、4 記載のラマン増幅器では、隣り合う波長の励起光を光ファイバ 2 に互いに異なる 2 方向に伝播して信号光を双方向励起する構成としたため、図 1 や図 2、図 3 に示される WDM カブラ 11 に要求される波長特性をあまくすることかできる。これは図 15 に示すように、双方向合わせた全ての励起光では中心波長が  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$ 、 $\lambda_4$  となり間隔が 6nm 以上 35nm 以下であるが、一方の励起光だけについてみると中心波長が  $\lambda_1$  と  $\lambda_3$ 、 $\lambda_2$  と  $\lambda_4$  となり波長間隔は 2 倍になり、WDM カブラ 11 の要求特性に余裕を持たすことができる。

【0051】本発明のうち請求項 5 記載のラマン増幅器では、ラマン増幅器への入力光又は出力光をモニタし、その結果に基づいて励起光発生手段 1 の各励起光パワーを制御して、ラマン増幅器の出力光パワーを所定値に保つ制御手段 4 を備えるため、ラマン増幅器への入力信号パワーの変動やラマン増幅用ファイバの損失のばらつきによらず、一定の出力を得ることができる。

【0052】本発明のうち請求項 6 記載のラマン増幅器では、ラマン利得を平坦化する出力光パワー制御手段 4 を備えるので、利得を平坦化することができる。特に請求項 7、8 記載のラマン増幅器では、図 16 (a) や (b) に示す様に各励起光の波長に各々約 100nm を加えた波長の波長光をモニタし、それら波長光のパワーを揃える様に各励起光のパワーを制御するため、利得を平坦化することができる。また、後に記載する波長安定化用のファイバグレーティング (外部共振器 5) を接続した

ものでは、駆動電流の変化による中心波長の変化が抑えられるため、利得の制御を可能にする手段としても作用する。

【0053】本発明のうち請求項9記載のラマン増幅器では、入力信号パワーと出力信号パワーをモニタし、それらの比が一定になる様に励起光パワーを制御して、ラマン増幅器の利得を所定値に保つ制御手段4を備えるため、ラマン増幅器への入力信号パワーの変動やラマン増幅用ファイバの損失のばらつきによらず、一定の利得を得ることができる。

【0054】本発明のうち請求項10記載のラマン増幅器では、ファブリペロー型の半導体レーザ3の出力側にファイバグレーティング等の波長安定化用の外部共振器5を設けるので、ファブリペロー型の半導体レーザ3のモードホップによる利得の変動による雑音を抑制することができる。また、半導体レーザ3に波長安定化用の外部共振器5を接続すると、1つの励起光源について見ると帯域幅を狭くすることになるが、WDM カブラ11 (図1、2、3) で合波する際に、波長間隔を狭くすることができるため、最終的には、より高出力で広帯域な励起光が得られる。

【0055】本発明のうち請求項11記載のラマン増幅器では、半導体レーザ3の励起光を各波長毎に偏波合成して使用するため、利得の偏波依存性を解消すると同時に光ファイバ2に入射される励起光パワーを増加させることができる。ラマン増幅において利得が得られるのは、励起光の偏波と一致する成分のみであるため、励起光が直線偏波であり且つ増幅用ファイバが偏波保持ファイバでない場合、信号光と励起光の相対偏波の変動により利得が変動するが、直線偏波の励起光源を偏波面が直交するように合成することは、利得の偏波依存性を解消すると同時にファイバに入射される励起光パワーを増加させることになる。

【0056】本発明のうち請求項12記載のラマン増幅器では、複数の波長のファブリペロー型、DFB 型、DBR 型の半導体レーザ又はMOPAを合波する手段として、マッハツェンダ干渉計を原理とする平面光波回路型の波長合波器を使用するため、複数の波長のファブリペロー型の半導体レーザを多数合波する場合にも、極めて低損失で合波することができ、高出力な励起光が得られる。

【0057】本発明のうち請求項13記載のラマン増幅器では、図6に示す様に偏波面を90度回転する偏波面回転手段7を備え、光ファイバ2に励起光発生手段1で発生された複数の励起光とそれらと偏波面が直交される励起光とが同時に存在する様にしたため、原理的には、信号光の偏波面がいかようであろうとも常に一定の利得を得ることができる。ラマン増幅の帯域は、励起光の帯域に依存するため、複数の波長の励起光をWDM カブラ11で合波することは、増幅用の光ファイバ2に入射される励起光を広帯域化し、その結果としてラマン利得を広帯

域化することになる。

【0058】本発明のうち請求項14記載のラマン増幅器では、光ファイバ2に非線形屈折率 $n_2$ が $3.5 \times 10^{-20} [\text{m}^2/\text{W}]$  以上のものを使用するため、これまでの研究による成果であるが、十分な増幅効果が得られる。

【0059】本発明のうち請求項15乃至請求項17記載のラマン増幅器では、光ファイバ2は信号光を伝播するための伝送用ファイバの一部として存在するので、伝送用光ファイバにそのまま増幅器を構成することが可能である。

【0060】本発明のうち請求項18記載のラマン増幅器では、光ファイバ2は信号光を伝播するための伝送用ファイバと独立された、同伝送用ファイバ中に挿入されるラマン増幅用ファイバとして存在するため、光ファイバ2にラマン増幅に適した光ファイバを利用することや、波長分散補償用ファイバを利用することが容易にでき、また集中型増幅器を構成することができる。

【0061】本発明のうち請求項19記載の光中継器では、ラマン増幅器を用いて光ファイバ伝送路8の損失を補償するため、請求項1乃至請求項18に記載のラマン増幅器の作用を持つ光中継器を得ることができる。

【0062】本発明のうち請求項20及び請求項24記載の光中継器では、ラマン増幅器の残留励起光を光ファイバ伝送路8に入射し、光ファイバ伝送路8におけるラマン増幅効果を利用することにより、光ファイバ伝送路8の損失の一部を補償することができる。

【0063】本発明のうち請求項21記載の光中継器では、ラマン増幅器の前段又は後段又は前後両段に希土類添加ファイバ増幅器9を備え、これらラマン増幅器9及び希土類添加ファイバ増幅器10で光ファイバ伝送路8の損失を補償するため、様々な伝送系に適する所望の増幅特性を得ることができる。

【0064】本発明のうち請求項22及び請求項26記載の光中継器では、ラマン増幅器の残留励起光を希土類添加ファイバ増幅器10の励起光として利用することにより、使用する半導体レーザの数を減らすことができる。

【0065】本発明のうち請求項23に記載の光中継器では、ラマン増幅器9の光ファイバ2に分散補償用ファイバを用いてなるため、当該ラマン増幅器9で光ファイバ伝送路8の波長分散を補償し、光ファイバ伝送路8及び増幅用ファイバ2における損失の一部又は全てを補償することができる。

【0066】本発明のうち請求項25記載の光中継器では、ラマン増幅器9の前段又は後段又は前後両段に希土類添加ファイバ増幅器10を備え、これらラマン増幅器9及び希土類添加ファイバ増幅器10で光ファイバ伝送路8の損失と波長分散を補償するため、様々な伝送系に適する所望の増幅特性を得ることができる。

【0067】また、本発明のうち、ラマン増幅器9と希

10

20

30

40

50

土類添加ファイバ増幅器 10 を組み合わせた構成では、様々なシステムに適應できる中継器を得ることができることを、ラマン増幅器 9 の増幅用ファイバに DCF を用いた場合を例として説明する。図 17 は従来の光中継器の設計パラメータの例であり、システム毎に G1、G2 が異なっている。また、中継器入力と DCF 損失は、中継器の間隔のばらつきや DCF のばらつきにより、変動することが避けられない。この変動は EDFA の利得の変動に直結しており、その利得の変化が平坦度の劣化につながる。図 18 は EDFA の利得と平坦度の関係を模式的に示したものであるが、平坦度の最適化は使用帯域と平均利得を限定して行われるため、平均利得が最適化した点からずれると、利得の波長依存性が変化して平坦度が劣化する。平坦度の劣化を避けるためには、EDFA の利得は一定に保たれる必要がある。従来は、入力レベルや DCF 損失の変動を補償する手段として、可変減衰器が用いられてきた。図 19 (a) に入力レベルの変動に応じて、可変減衰器の減衰量を調整し、DCF への入力レベルを一定に制御する例と、図 19 (b) に DCF の損失の変動に応じて、減衰量を調整し、中間損失を一定に制御する例を示す。どちらの場合も 2 つの EDFA は利得一定となっている。しかしながら、この方法では、可変減衰器によって無駄な損失を加えるため雑音特性上不利である。

【0068】本発明では、中継器の設計パラメータの変化を DCF のラマン増幅効果で補償することによって、EDFA の利得を一定に保ち、システム毎に EDFA を設計する必要性をなくし、且つ平坦度も雑音特性も犠牲にすることなく、中継器間隔のばらつきや DCF のばらつきを補償することができる。図 20 は図 17 の中継器仕様に対して、DCF のラマン増幅効果を適用した場合の EDFA の設計値を示したものである。DCF のラマン利得を適当に選ぶことによって、3 つの仕様に対して要求される EDFA の特性を共通にすることができる。また、図 21 (a)、

(b) に示す様に入力レベルや DCF 損失の変動は、EDFA の利得を変化させることなく、ラマン利得を変化させることによって補償することができる。いずれの場合も、EDFA の利得を一定に保ちつつ、DCF の出力レベルが一定になるようにラマン増幅利得を調整している。さらに、DCF 自体の損失をラマン増幅で補償することは、従来避けることのできなかった DCF 挿入に起因する雑音特性の劣化を軽減する。図 37 に DCF 挿入した場合の雑音指数の劣化量と同じ DCF を用いたラマン増幅器を挿入した場合の雑音指数の劣化量の測定値を示す。

【0069】本発明のうち請求項 29～35 に記載の光中継器では、励起光の波長が単一であるラマン増幅器を備えるため、複数の波長で励起されたラマン増幅器を備えた光中継器と比較すると動作範囲が狭い構成が単純で帯域幅以外はこれまでに述べた光中継器と同等の特性を得ることができる。図 38、図 39 に単一波長で励起されたラマン増幅器を用いた光中継器と複数の波長で励起

されたラマン増幅器を用いた光中継器の測定例を示した。

#### 【0070】

【発明の実施の形態】（ラマン増幅器の実施形態 1）図 1 は本発明のラマン増幅器の第 1 の実施形態であり、信号光入力ファイバ 12 と、増幅用ファイバ（光ファイバ）2、WDM カプラ 13、励起光発生手段 1、モニタ光分配用カプラ 14、モニタ信号検出及び LD 制御信号発生回路 15、信号光出力ファイバ 16、偏波無依存アイソレータ 25 から構成されている。ここでモニタ光分配用カプラ 14 とモニタ信号検出及び LD 制御信号発生回路 15 は出力光パワー制御手段 4 を構成している。

【0071】励起光発生手段 1 は、ファブリペロー型の半導体レーザ 3 ( $3_1$ 、 $3_2$ 、 $3_3$ 、 $3_4$ ) と、波長安定化用のファイバグレーティング（外部共振器）5 ( $5_1$ 、 $5_2$ 、 $5_3$ 、 $5_4$ ) と、偏波合成カプラ（偏波合成器）6 ( $6_1$ 、 $6_2$ ) と、WDM カプラ 11 とから構成されている。ここで半導体レーザ  $3_1$ 、 $3_2$  の発振波長と、ファイバグレーティング  $5_1$ 、 $5_2$  の透過波長は共に同じ波長  $\lambda_1$  であり、半導体レーザ  $3_3$ 、 $3_4$  の中心波長と、ファイバグレーティング  $5_3$ 、 $5_4$  の透過波長は共に同じ波長  $\lambda_2$  であり、半導体レーザ  $3_1$ 、 $3_2$ 、 $3_3$ 、 $3_4$  の発振波長は波長安定化用ファイバグレーティング  $5_1$ 、 $5_2$ 、 $5_3$ 、 $5_4$  の作用により中心波長が  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  に安定化されるようにしてある。また前記波長  $\lambda_1$  と  $\lambda_2$  の波長間隔は 6nm 以上 35nm 以下としてある。

【0072】前記半導体レーザ  $3_1$ 、 $3_2$ 、 $3_3$ 、 $3_4$  で発生される励起光はその波長  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  ごとに偏波合成カプラ 6 で偏波合成され、各偏波合成カプラ 6 の出力光が WDM カプラ 11 で合波されて励起光発生手段 1 の出力光となるようにしてある。半導体レーザ 3 から偏波合成カプラ 6 の間は偏波面保存ファイバ 17 で接続され、偏波面が異なる 2 つの励起光が得られる様にしている。励起光発生手段 1 の出力光は WDM カプラ 13 により増幅用ファイバ 2 に結合され、一方、信号光（波長分割多重光）は信号光入力ファイバ 12 より増幅用ファイバ 2 に入射され、同増幅用ファイバ 2 で励起光発生手段 1 の励起光と合波されてラマン増幅され、WDM カプラ 13 を通過し、モニタ光分岐用カプラ 14 において、その一部はモニタ信号として分岐され、残りは信号光出力ファイバ 16 へ出力される。前記モニタ信号はモニタ信号検出及び LD 制御信号発生回路 15 において監視され、同回路 15 は信号波長帯域内の利得偏差が小さくなるように各半導体レーザ 3 の駆動電流を制御する信号を発生する。

【0073】前記増幅用ファイバ 2 はラマン増幅に適した特殊ファイバ、例えば非線形屈折率  $n_2$  が  $3.5 \times 10^{-20} [\text{m}^2/\text{W}]$  以上であるものを用いても良いし、信号光が入力される信号入力ファイバ 12 をそのまま延長して用いても良い。また、km 当たり -20ps/nm 未満の分散を持つ



RDF (Reverse Dispersion Fiber) をSMF につなぎ、伝送路を兼ねた増幅用ファイバとして使用してもよい。

(一般にRDF は20ps/nm未満の分散を持つためにSMF の長さと同程度から2倍の長さで使用すると良い。) このような場合には、ラマン増幅用の励起光がRDF からSMF へ向って伝播するような構成とするのが好都合である。このラマン増幅器は増幅用ファイバ2を信号光が伝送される図示されていない伝送用ファイバに接続・挿入可能な構成とし、増幅用ファイバ2や励起光発生手段1、WDM カプラ13、モニタ光分岐用カプラ14、モニタ信号検出及びLD制御信号発生回路15を一式組み込んで集中型ラマン増幅器を構成することもできる。

【0074】図22は図1のラマン増幅器における出力スペクトルを測定したものである。この測定で用いた励起光波長 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ は1435nmと1465nm、信号光は-20dBm/ch1540nmから1560nmの間に等間隔に8波入力した。増幅用ファイバ2は約6kmの分散補償用ファイバで、チャンネル間偏差を0.5dB 以内に保ちつつ、分散補償用ファイバの損失を補償するように励起光のパワーが調整されている。

【0075】(ラマン増幅器の実施形態2) 図2は本発明のラマン増幅器の第2の実施形態であり、励起光発生手段1からの励起光が増幅用ファイバ2を信号光と同じ向きに進行されるように構成されたものである。具体的には増幅用ファイバ2の前端側にWDM カプラ13が設けられ、励起光発生手段1からの励起光がWDM カプラ13を介して増幅用ファイバ2の前端(入力端) 側から後端(出力端) 側へと伝送されるようにしたものである。この構成では、信号の減衰が起こる前に増幅されるため、実施形態1の構成と比較して、信号光の雑音特性が良いことがわかっている。また、実施形態1の構成と比較すると利得が小さいこともわかっている。

【0076】(ラマン増幅器の実施形態3) 図3は本発明のラマン増幅器の第3の実施形態であり、励起光発生手段1からの励起光が増幅用ファイバ2を双方向に進行されるように構成されたものである。具体的には、増幅用ファイバ2の前端側と後端側とに夫々WDM カプラ13が設けられ、2つのグループに分けられた励起光発生手段1からの励起光が夫々のWDM カプラ13を通じて増幅用ファイバ2に結合され、前端側のWDM カプラ13に入力された励起光が増幅用ファイバ2の後端側に進行され、後端側のWDM カプラ13に入力された励起光が増幅用ファイバ2の前端側に進行されるようにしたものである。

【0077】前記励起光発生手段1のうち第1のグループAに属する半導体レーザ3<sub>1</sub>、3<sub>2</sub>と第2のグループBに属する半導体レーザ3<sub>3</sub>、3<sub>4</sub>の中心波長はいずれも同じであり、第1のグループAに属する半導体レーザ3<sub>1</sub>、3<sub>2</sub>と第2のグループBに属する半導体レーザ3<sub>3</sub>、3<sub>4</sub>の中心波長はいずれも同じである。また、ファ

イバグレーティング5<sub>1</sub>～5<sub>4</sub>は夫々が接続される半導体レーザ3の中心波長に合わされている。

【0078】(ラマン増幅器の実施形態4) 前記図3の実施形態において、第1のグループAに属する半導体レーザ3<sub>1</sub>、3<sub>2</sub>の中心波長を $\lambda_1$ 、同グループAに属する半導体レーザ3<sub>3</sub>、3<sub>4</sub>の中心波長を $\lambda_3$ 、第2のグループBに属する半導体レーザ3<sub>5</sub>、3<sub>6</sub>の中心波長を $\lambda_2$ 、同グループBに属する半導体レーザ3<sub>7</sub>、3<sub>8</sub>の中心波長を $\lambda_4$ とし、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$ 、 $\lambda_4$ を互いに隣り合う波長として構成することもできる。この場合も、中心波長の間隔は10nm以上30nm以下であり、最大の中心波長 $\lambda_4$ と最小の中心波長 $\lambda_1$ との差は100nm 以下である。このような構成では同一グループ内で合波する励起光の波長間隔に余裕を持たすことができ、WDM カプラ4に要求される性能を甘くすることができる。

【0079】(ラマン増幅器の実施形態5) 図40は本発明のラマン増幅器の第5の実施形態であり、前記各実施形態で説明したラマン増幅器9の中から適当なものを選び、それらを多段接続したものである。所望の増幅特性や雑音特性に合わせて、特徴の異なるラマン増幅器9を適切に選択することで、単一のラマン増幅器9では得られない特性を得ることができる。

【0080】前記各実施形態において、出力光パワー制御手段4は図4又は図5に示す構成とすることができ、図4の構成は、図1又は図2又は図3に示したモニタ光分岐用カプラ14に、波長分波器18とホトダイオード等の光/電変換手段19と、LD制御回路20とからなるモニタ信号検出及びLD制御信号発生回路15が接続されたものである。波長分波器18はモニタ光分岐用カプラ14で分岐された出力光を複数の波長光に分波し、この場合、個々の励起光による最大増幅波長(励起光波長に100nm を加えた波長) 付近の光を分波し、具体的には、励起波長が1430nmと1460nmとならば、1530nmと1560nm付近の波長光を分波する。光/電変換手段19は受光した波長光を電気信号に変換するもので、受光レベルの大小に応じて出力電圧が変化される。LD制御回路20は光/電変換手段19からの出力電圧に応じて半導体レーザ3の駆動電流を変化するものであり、光/電変換手段19からの出力電圧を演算処理して、前記各波長光の光パワーを揃える様に半導体レーザ3を制御する。即ち、出力光パワー制御手段4はラマン利得の波長依存を解消して利得を平坦化する働きをする。

【0081】図5の構成は、図1又は図2又は図3に示したモニタ光分岐用カプラ14に、分岐カプラ21と、バンドパスフィルタ22と、ホトダイオード等の光/電変換手段19と、LD制御回路20とからなるモニタ信号検出及びLD制御信号発生回路15が接続されたものである。分岐カプラ21はモニタ光分岐用カプラ14で分岐された出力光を励起光の数と同数に分岐するものである。バンドパスフィルタ22は夫々透過中心波長が異な



り、この場合、個々の励起光による最大増幅波長（励起光波長に100nmを加えた波長）付近の光を透過し、具体的には、励起波長が1430nmと1460nmとならば、1530nmと1560nm付近の波長光を透過する。光／電変換手段19は受光した波長光を電気信号に変換するもので、受光レベルの大小に応じて出力電圧が変化される。LD制御回路20は光／電変換手段19からの出力電圧に応じて半導体レーザ3の駆動電流を変化するものであり、光／電変換手段19からの出力電圧を演算処理して、前記各波長光の光パワーを描える様に半導体レーザ3を制御する。即ち、出力光パワー制御手段4はラマン利得の波長依存を解消して利得を平坦化する働きをする。図4、5は図27に示す様に出力光をモニタして励起光発生手段1を制御する構成であるが、図26に示す様に入力光をモニタして励起光発生手段1を制御する構成とすることもでき、或いは図28に示す様に出力光と入力光とを共にモニタして励起光発生手段1を制御する構成とすることもできる。

【0082】前記各構成のラマン増幅器においては、励起光を偏波合成コブラ6で合成する代わりに、図6

(a)、(b)に示す様に励起光の偏波面を90度回転する偏波面回転手段7を設け、増幅用ファイバ2に励起光発生手段1で発生された複数の励起光とそれらと偏波面が直交される励起光とが同時に存在する様にすることもできる。図6(a)は増幅用ファイバ2の一端にファラデーロータ3、と全反射ミラー3を設けて、増幅用ファイバ2に伝播された励起光を偏波面を90度回転し、再び増幅用ファイバ2に戻す様にしたものである。同図には増幅用ファイバ2に伝播されてラマン増幅された信号光を同ファイバ2から取り出すための手段は示していない。図6(b)は増幅用ファイバ2の一端にPBS33と偏波面保持ファイバ34とを設け、増幅用ファイバ2の一端から出力される励起光を主軸が90度振られて接続された偏波面保持ファイバ34により偏波面を90度回転し、再びPBS33を通じて増幅用ファイバ2の一端に入力するようにしたものである。

【0083】(光中継器の実施形態1)図7は本発明のラマン増幅器を用いて構成された光中継器の第1の実施形態であり、光ファイバ伝送路8中に挿入されて同光ファイバ伝送路8における損失を補償する光中継器の例である。この光中継器は図1、2、3に示した様なラマン増幅器9の後段に希土類添加ファイバ増幅器（以下、EDFAと記載する）10が接続されており、光ファイバ伝送路8に伝送される信号光がラマン増幅器9に入力されて増幅され、更にEDFA10に入力されて増幅され、光ファイバ伝送路8に出力される様にしたものである。利得調整はラマン増幅器9側で調整しても、EDFA10側で調整しても、その両方で調整しても良いが、全体で光ファイバ伝送路8の損失が補償される様にする。また、EDFA10が持つ利得の波長依存性と、ラマン増幅器9の波長依

存性との違いをうまく合わせて、EDFA10が持つ利得の波長依存性をラマン増幅器9の波長依存性により低減することも可能である。

【0084】(光中継器の実施形態2)図8は本発明のラマン増幅器を用いて構成された光中継器の第2の実施形態であり、図7の光中継器において、ラマン増幅器9の前段にもEDFA10を設けたものである。

【0085】(光中継器の実施形態3)図9は本発明のラマン増幅器を用いて構成された光中継器の第3の実施形態であり、2つのEDFA10の間に分散補償ファイバ

(DCF)を増幅ファイバ2として用いるラマン増幅器9が設けられたものである。ラマン増幅器9とその後段のEDFA10との間には、ラマン増幅器9からの出力光を分岐する分岐コブラ23と、その分岐光をモニタしてラマン増幅器9の利得を制御するモニタ信号検出及びLD制御信号発生回路24とが設けられている。モニタ信号検出及びLD制御信号発生回路24はラマン増幅器9の出力パワーを所定値に保つことができるような制御回路である。なお、ラマン増幅器9自体が図4や図5に示す出力光パワー制御手段4を備える場合は、出力光のパワーが所定値になるように制御されると同時に、複数の出力信号間のレベル偏差が小さくなるようにも励起光のパワーが制御される。

【0086】図9の光中継器では、ラマン増幅器9の出力光レベル、即ち第2のEDFA10への入力光レベルがDCFの損失や第1のEDFA10の出力レベルに影響されことなく、常に一定に保たれる。これは、中継器の出力が規定されている場合に、第2のEDFA10の利得が一定に保たれるということを保証する。これにより、DCFの損失変動などに起因する第2のEDFA10の利得平坦度劣化が回避される。また、第1のEDFA10が利得一定となるように制御するならば、中継器への入力の変動はラマン増幅器9の利得の変動で補償される。つまり、中継器利得の調整はラマン増幅器9の利得のみで行われることとなり、EDFA10の利得変動による平坦度の劣化を完全に回避することができる。

【0087】(光中継器の実施形態4)図10は図9の実施形態において、第1のEDFA10とラマン増幅器9との間にも光レベルをモニタしてラマン増幅器9の利得を調整する制御手段を付加したものである。これを用いて、ラマン増幅器9の入力と出力のレベル差を一定に保つように励起光を制御することができ、これはDCFの損失ばらつきのみを補償することができる。

【0088】(光中継器の実施形態5)図11は上記実施形態において、ラマン増幅器9内に設けられている利得平坦化モニタ機構を中継器の出力端に移し、中継器全体の利得を平坦化するモニタとして利用する例である。この場合、第1のEDFA10及び第2のEDFA10は利得一定制御と出力一定制御のどちらでも構わない。中継器出力における出力信号間のレベル偏差が小さくなるように

各励起光のパワーが個別に制御される。

【0089】（光中継器の実施形態6）本発明の光中継器は図1～図3に示す構成のラマン増幅器の増幅用ファイバ2に分散補償ファイバを使用して、光ファイバ伝送路8の波長分散を補償し、光ファイバ伝送路8及び増幅用ファイバ2における損失の一部又は全てを補償する光中継器を構成することもできる。

【0090】（光中継器の実施形態7）前記光中継器の各実施形態において、図41から図44に示す様な励起光発生手段1を使用したラマン増幅器9を備えた光中継器を構成することもできる。

【0091】（光中継器の実施形態8）図29～図31に示す様にラマン増幅器9の増幅用ファイバ2の途中にWDM カプラ13を挿入し、増幅用ファイバ2に伝播される励起光発生手段1からの残留励起光をラマン増幅器9の入力側又は出力側の光ファイバ伝送路8に設けたWDM プラ27を通じて同伝送路8に入射し、光ファイバ伝送路8においてもラマン利得を生じさせることができる。なお、図29～図32において26は光アイソレータである。

【0092】（光中継器の実施形態9）図31～図36に示す様に、光中継器がラマン増幅器9とEDFA10とからなる場合、ラマン増幅器9の増幅用ファイバ2の途中にWDM カプラ13を挿入し、増幅用ファイバ2に伝播される励起光発生手段1からの残留励起光をEDFA10に入射し、同EDFA10の励起光／補助励起光とすることができる。なお、図33～図36において26は光アイソレータである。

【0093】

【発明の効果】以上述べたように、本発明のラマン増幅器では、中心波長の間隔が6nm 以上35nm以下であり、中心波長の最大値と最小値の差が100nm 以内であるように励起光源の波長を選択することにより、利得平坦化フィルタを使用する必要がない程度に利得の波長依存性が小さくかつ利得が変化しても平坦度を保つことのできる光増幅器を提供することができる。また、この増幅器は伝送路の損失と波長分散を補償する光中継器として応用することも可能である。EDFAとの組み合わせで構成される中継器においては、中継器の入力変動やDCF 損失変動によるEDFAの利得変動を抑え、利得平坦度の劣化を回避することができ、様々なシステムに適応することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明のラマン増幅器の第1の実施形態を示すブロック図。

【図2】本発明のラマン増幅器の第2の実施形態を示すブロック図。

【図3】本発明のラマン増幅器の第3の実施形態を示すブロック図。

【図4】本発明のラマン増幅器における出力光パワー制

御手段の第1の例を示すブロック図。

【図5】本発明のラマン増幅器における出力光パワー制御手段の第2の例を示すブロック図。

【図6】（a）、（b）は本発明のラマン増幅器における偏波面回転手段の異なる例を示すブロック図。

【図7】本発明の光中継器の第1の実施形態を示すブロック図。

【図8】本発明の光中継器の第2の実施形態を示すブロック図。

【図9】本発明の光中継器の第3の実施形態を示すブロック図。

【図10】本発明の光中継器の第4の実施形態を示すブロック図。

【図11】本発明の光中継器の第5の実施形態を示すブロック図。

【図12】励起光の波長間隔を6nm 以上にする理由を示した説明図。

【図13】（a）、（b）は励起光の波長間隔を35nm以下にする理由を示した説明図。

【図14】励起光の最大波長と最小波長との差を100nm以下にする理由を示した説明図。

【図15】双方向励起における励起光の波長配列の例を示した説明図。

【図16】（a）は励起光パワーを一定とする場合の帯域利得を示した説明図、（b）は励起光パワーを制御して帯域利得を平坦化する様子を示した説明図。

【図17】（a）、（b）は光中継器の設計に関する特性を示した説明図。

【図18】EDFAの利得変動と平坦度劣化の関係を示した説明図。

【図19】（a）は可変減衰器による入力レベル変動の補償の様子を示した説明図、（b）は可変減衰器によるDCF 損失変動の補償の様子を示した説明図。

【図20】（a）、（b）はDCF ラマン増幅効果を利用した光中継器の設計に関する特性を示した説明図。

【図21】（a）はラマン増幅効果による入力レベル変動の補償の様子を示した説明図、（b）はラマン増幅効果によるDCF 損失変動の補償の様子を示した説明図。

【図22】ラマン増幅器による出力スペクトルの異なる例を示した説明図。

【図23】EDFAによる利得の波長依存性を示した説明図。

【図24】EDFAによる利得の変動を示した説明図。

【図25】ラマン増幅による利得の波長依存性を示した説明図。

【図26】入力光をモニタして出力光パワーを制御する制御方法のブロック図。

【図27】出力光をモニタして出力光パワーを制御する制御方法のブロック図。

【図28】入力光と出力光とをモニタして出力光パワー

を制御する制御方法のブロック図。

【図 29】ラマン増幅器の残留励起光を光ファイバ伝送路に伝送してラマン利得を得る方法の第 1 例を示したブロック図。

【図 30】ラマン増幅器の残留励起光を光ファイバ伝送路に伝送してラマン利得を得る方法の第 2 例を示したブロック図。

【図 31】ラマン増幅器の残留励起光を光ファイバ伝送路に伝送してラマン利得を得る方法の第 3 例を示したブロック図。

【図 32】ラマン増幅器の残留励起光を光ファイバ伝送路に伝送してラマン利得を得る方法の第 4 例を示したブロック図。

【図 33】ラマン増幅器の残留励起光を EDFA の励起光として活用する方法の第 1 例を示したブロック図。

【図 34】ラマン増幅器の残留励起光を EDFA の励起光として活用する方法の第 2 例を示したブロック図。

【図 35】ラマン増幅器の残留励起光を EDFA の励起光として活用する方法の第 3 例を示したブロック図。

【図 36】ラマン増幅器の残留励起光を EDFA の励起光として活用する方法の第 4 例を示したブロック図。

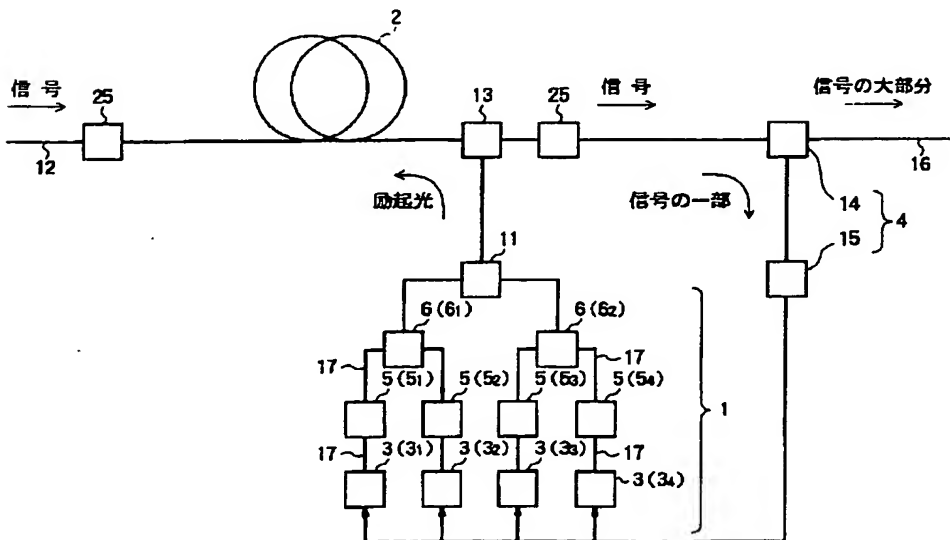
【図 37】分散補償用ファイバ挿入による雑音指数の劣化を示した説明図。

【図 38】ラマン増幅器の励起波長数と中継器の特性を示した説明図。

【図 39】ラマン増幅器の励起波長数と中継器の特性を示した説明図。

\*

【図 1】



\* 【図 40】複数のラマン増幅器を多段接続してなる光中継器のブロック図。

【図 41】単一の励起光光源を有する励起光発生手段の一例を示したブロック図。

【図 42】単一の励起光光源を有する励起光発生手段の他の例を示したブロック図。

【図 43】2つの励起光光源を有する励起光発生手段の一例を示したブロック図。

【図 44】2つの励起光光源を有する励起光発生手段の他の例を示したブロック図。

【図 45】分散補償用ファイバを増幅用ファイバとするラマン増幅器のブロック図。

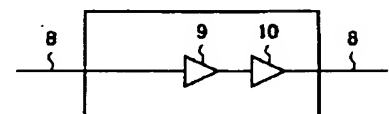
【図 46】従来の光中継器の一例を示したブロック図。

【図 47】図 46 の光中継器における光レベルダイアグラムを示した説明図。

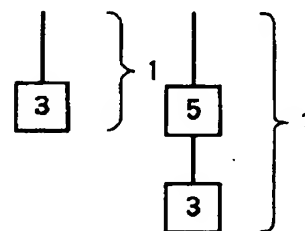
【符号の説明】

- 1 励起光発生手段
- 2 光ファイバ
- 3 ファブリペロー型の半導体レーザ
- 4 出力光パワー制御手段
- 5 外部共振器
- 6 偏波合成器
- 7 偏波面回転手段
- 8 光ファイバ伝送路
- 9 ラマン増幅器
- 10 希土類添加ファイバ増幅器

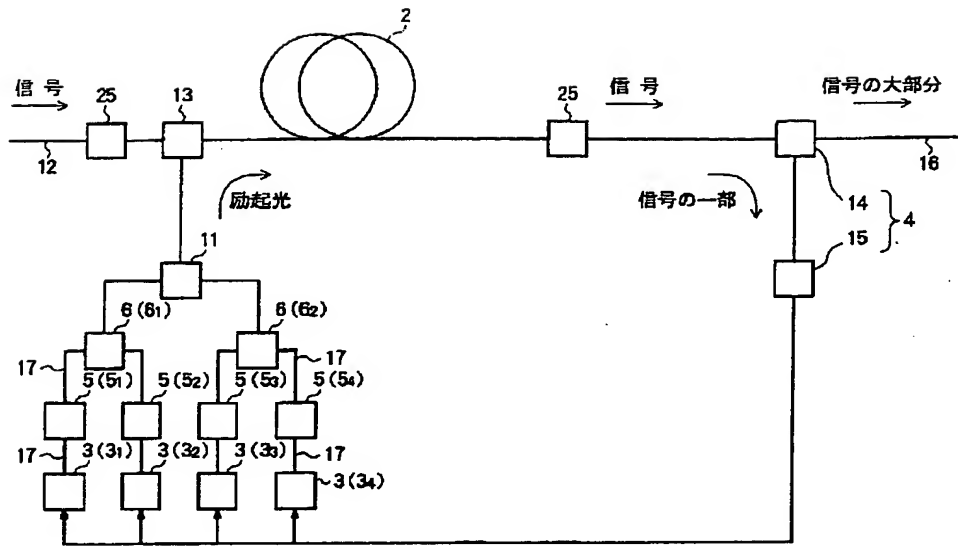
【図 7】



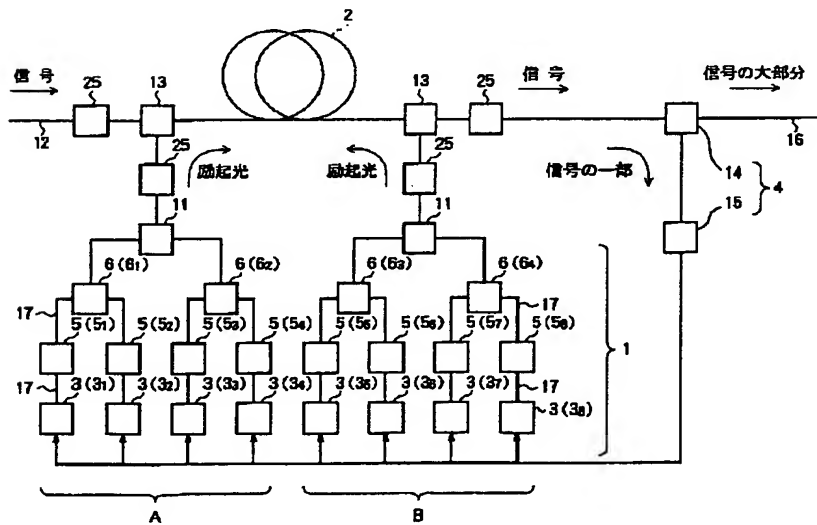
【図 41】 【図 42】



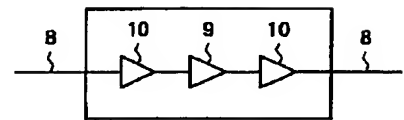
【図 2】



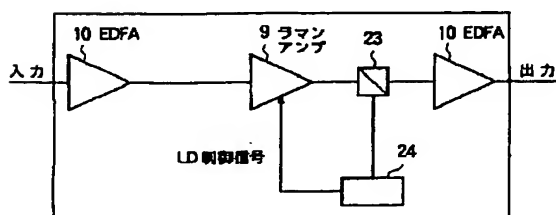
【図 3】



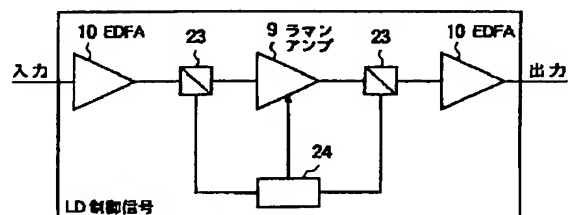
【図 8】



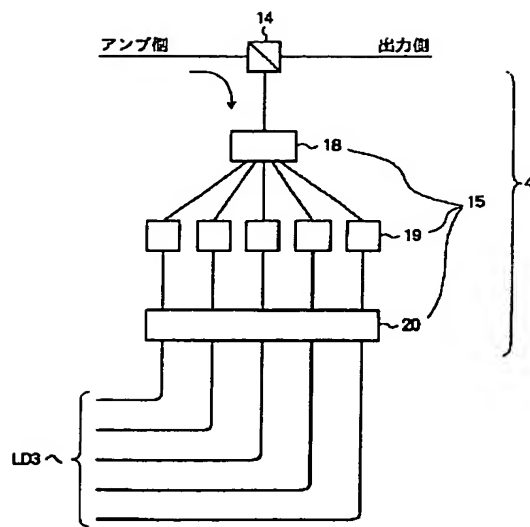
【図 9】



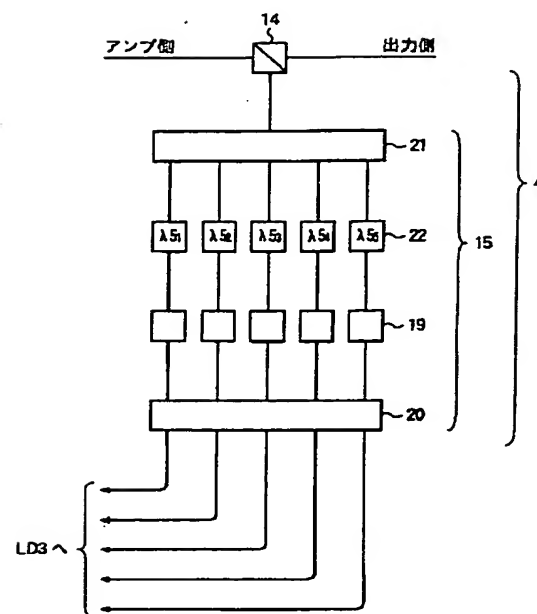
【図 10】



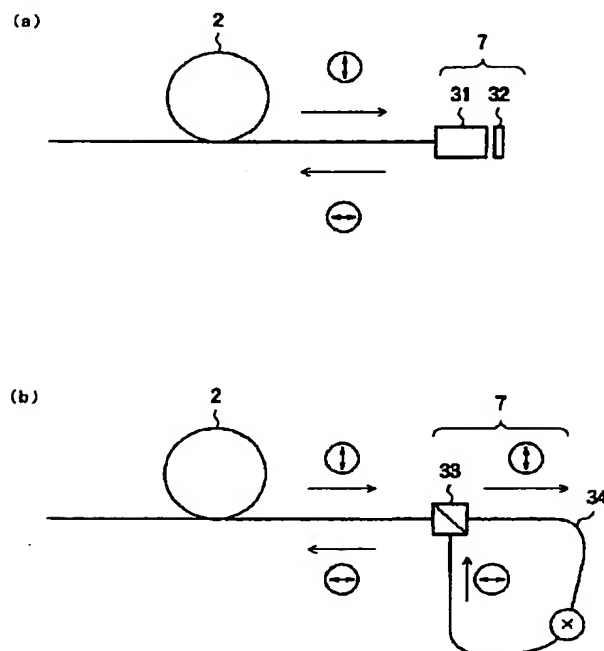
【図4】



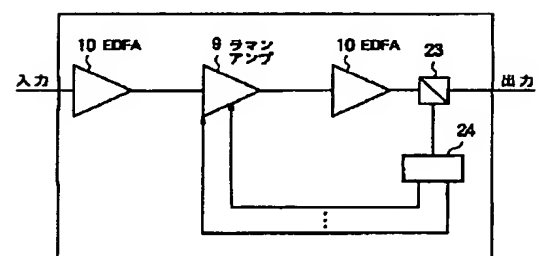
【図5】



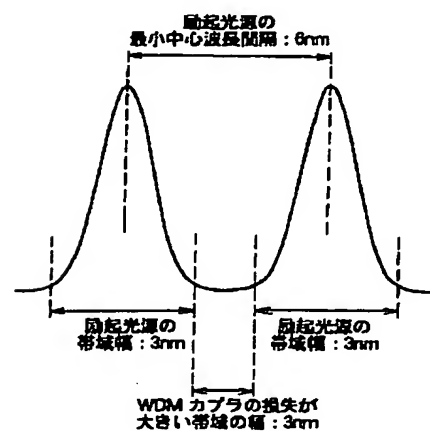
【図6】



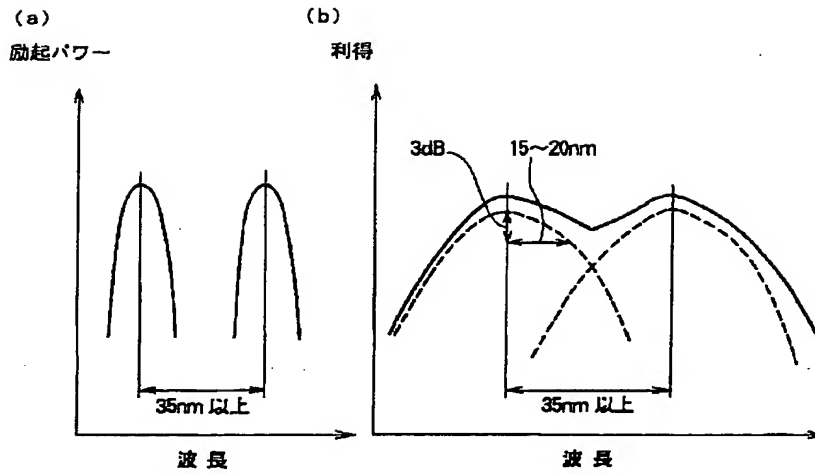
【図11】



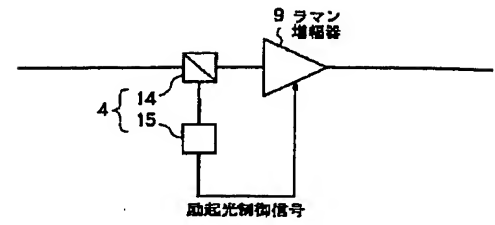
【図12】



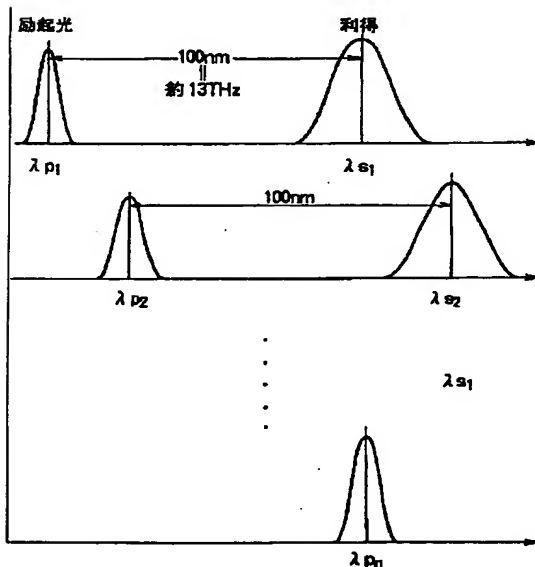
【図13】



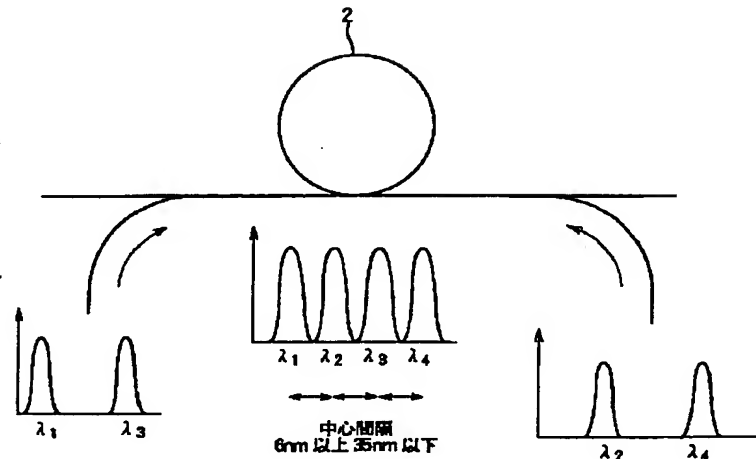
【図26】



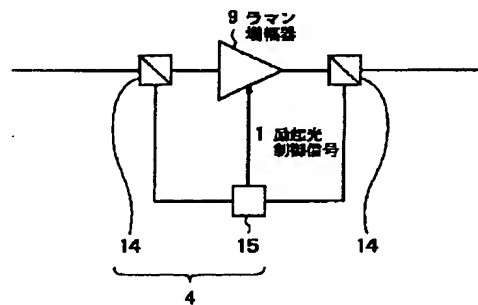
【図14】



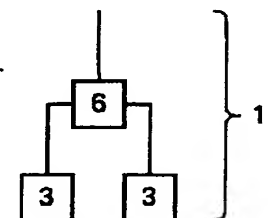
【図15】



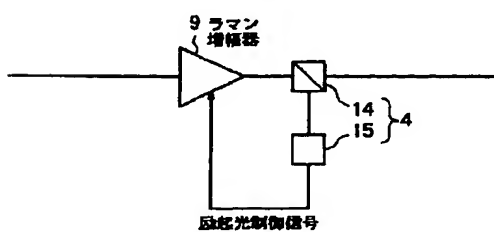
【図28】



【図43】



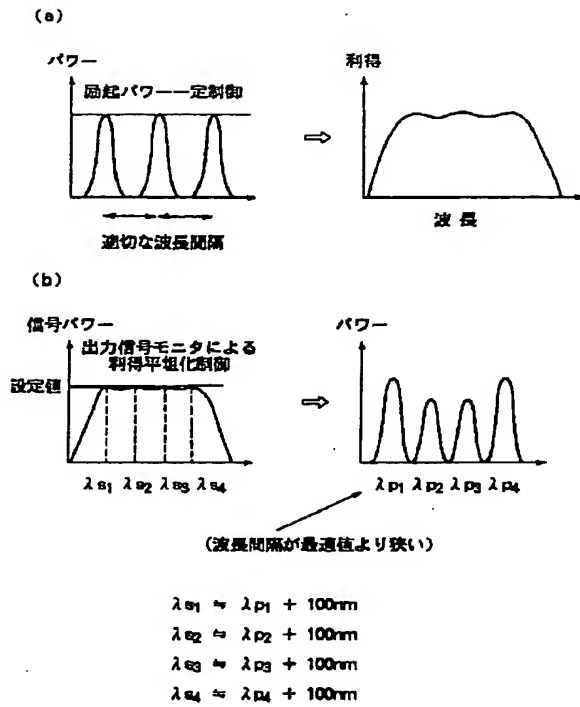
【図27】



重ならないためには  $\lambda_{pn} < \lambda_{s1}$   
 $\downarrow$   
 $\lambda_{pn} - \lambda_{p1} < 100\text{nm}$



【図16】



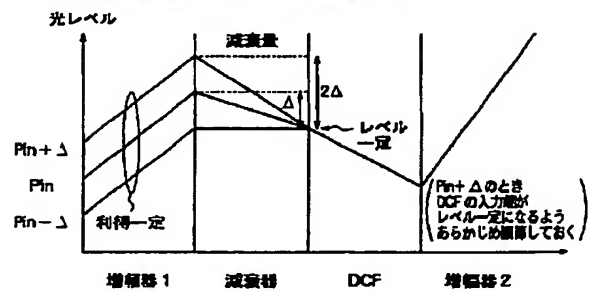
【図17】

中継器仕様	①	②	③
中継器入力 $P_{in}$ [dBm/ch]	$-20 \pm 3$	$-15 \pm 2$	$-15 \pm 1$
中継器出力 $P_{out}$ [dBm/ch]	10	10	5
DCF 損失 $L_d$ [dB]	$10 \pm 2$	$8 \pm 1.5$	$6 \pm 1$

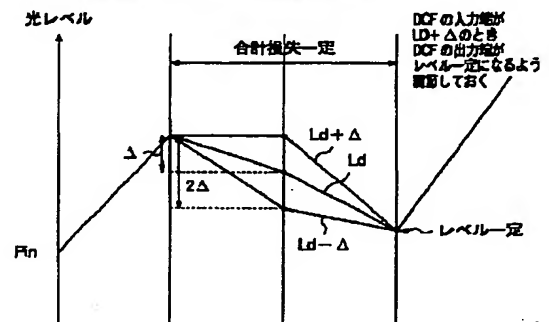
EDFA 設計例	①	②	③
増幅器1利得 $G_1$ [dB]	$20 \pm 3$	$15 \pm 2$	$15 \pm 1$
増幅器2利得 $G_2$ [dB]	$20 \pm 2$	$18 \pm 1.5$	$11 \pm 1$
中継器利得 $G_r$ [dB]	$30 \pm 3$	$25 \pm 2$	$20 \pm 1$

【図19】

(a) 可変減衰器による入力レベル変動の補償

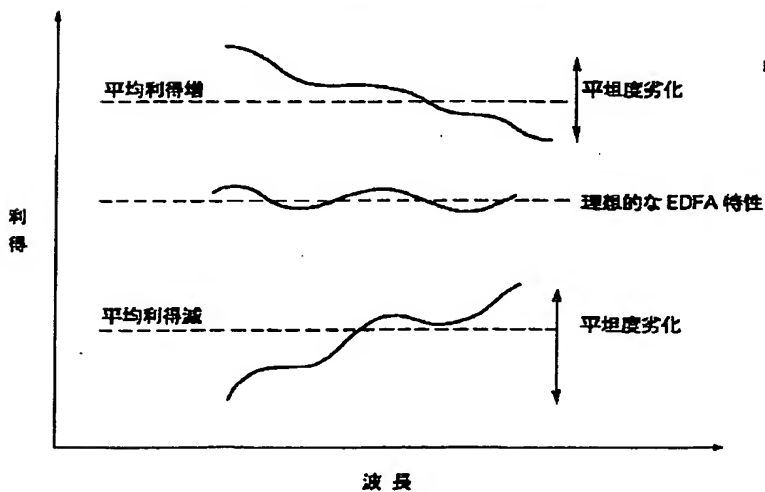


(b) 可変減衰器による DCF 損失変動の補償



【図18】

EDFA の利得変動と平坦度劣化の関係



【図 20】

(a)

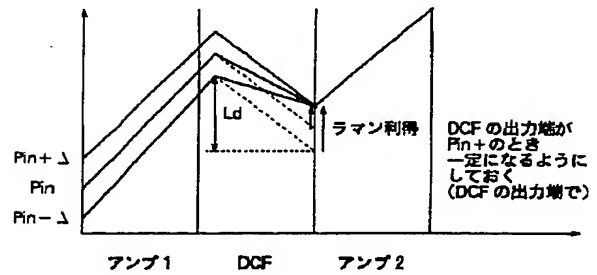
仕 様	①	②	③
中継器入力	$-20 \pm 3$	$-15 \pm 2$	$-15 \pm 1$
中継器出力	$+10$	$+10$	$+5$
DCF 損失	$10 \pm 2$	$8 \pm 1.5$	$6.5 \pm 1$

(b)

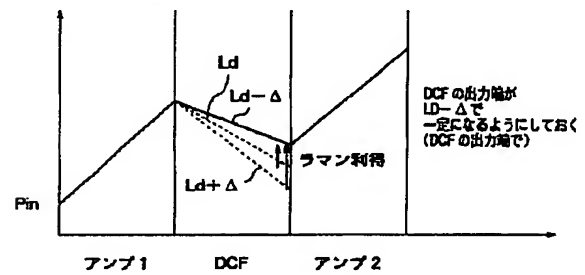
増幅器 1	13	13	13
増幅器 2	10	10	10
ラマン利得	$17 \pm 5$	$10 \pm 3.5$	$3 \pm 2$
中継器利得	$30 \pm 3$	$25 \pm 2$	$20 \pm 1$

【図 21】

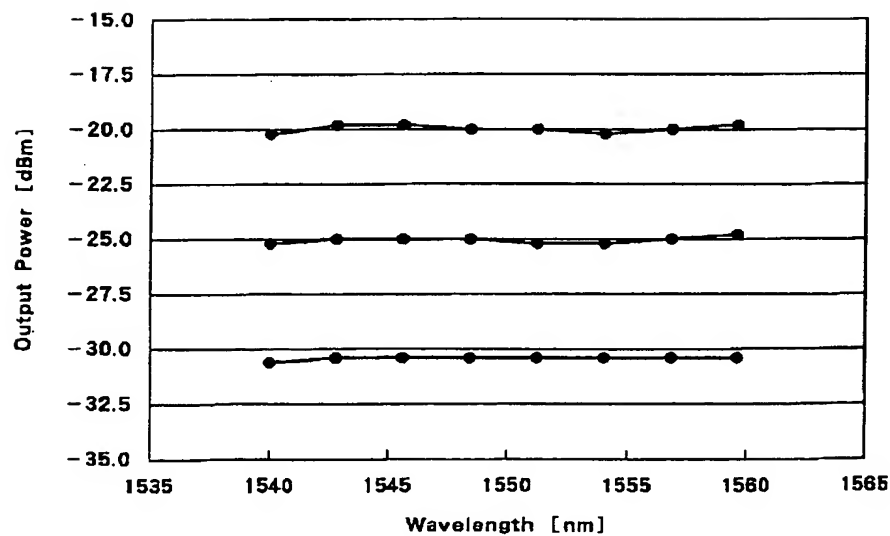
(a) ラマン増幅効果による入力レベル変動の補償



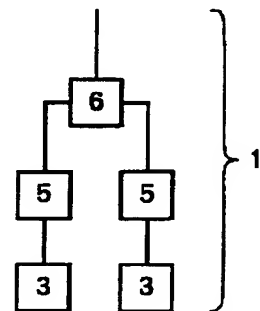
(b) ラマン増幅効果による DCF 損失変動の補償



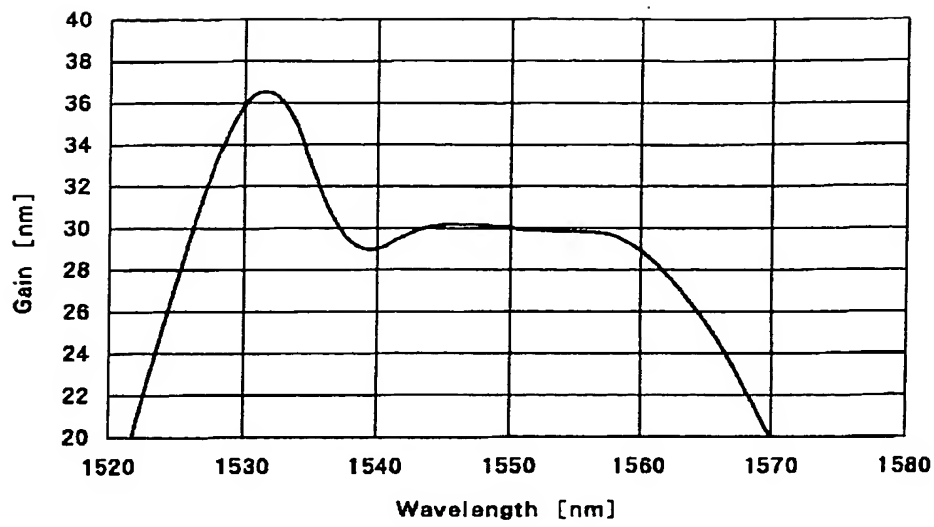
【図 22】



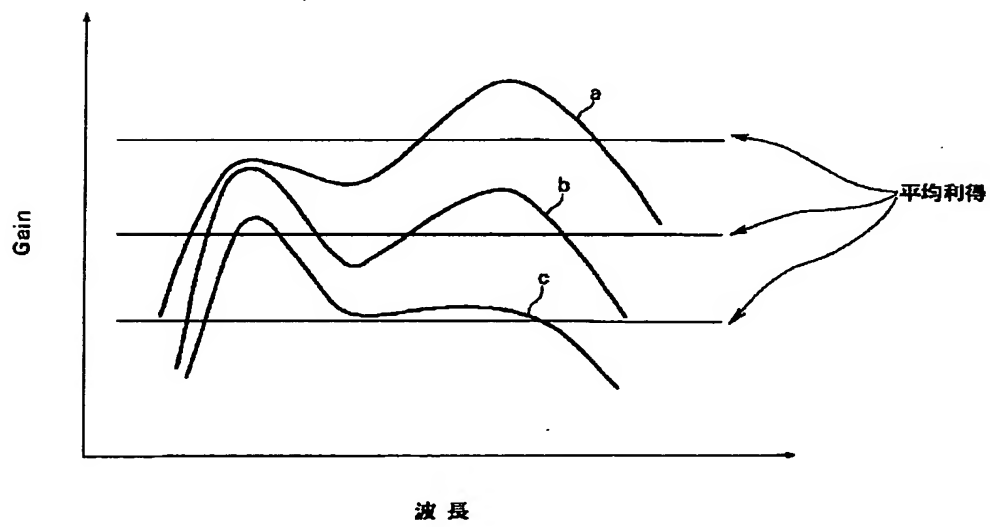
【図 44】



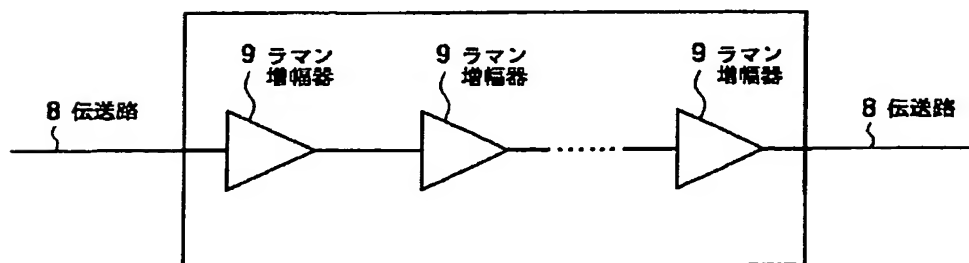
【図 23】



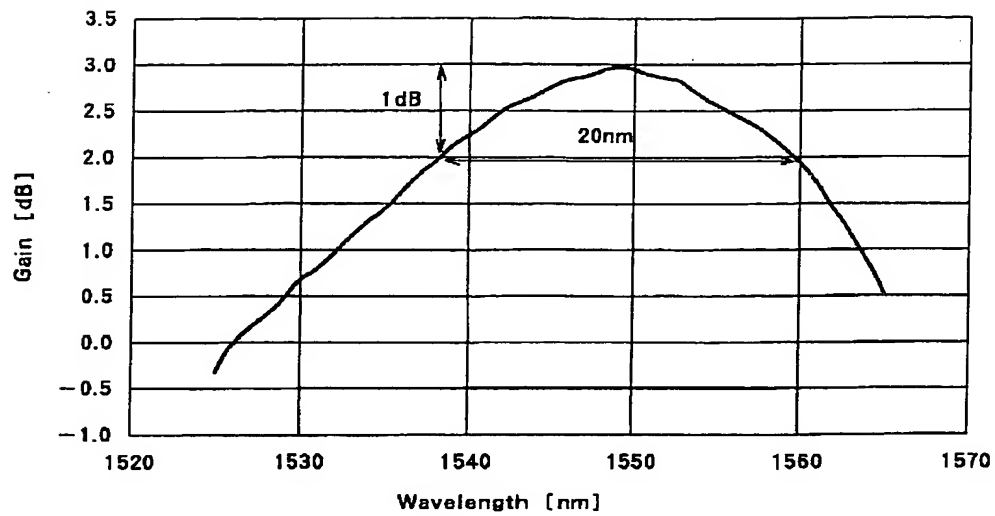
【図 24】



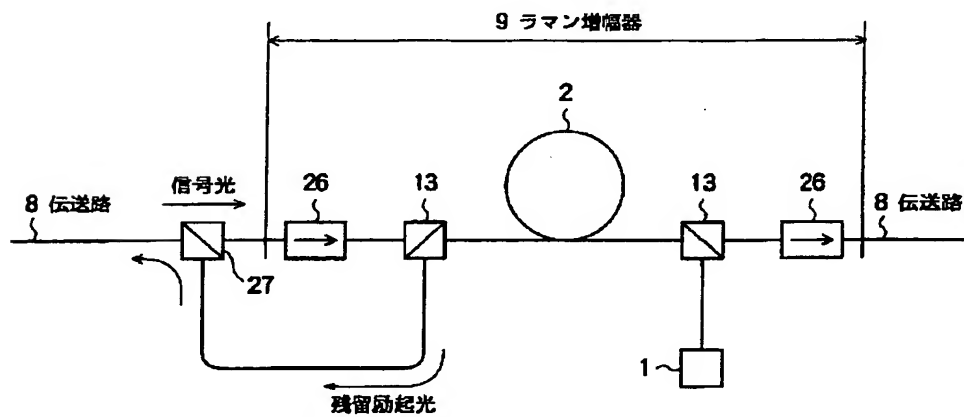
【図 40】



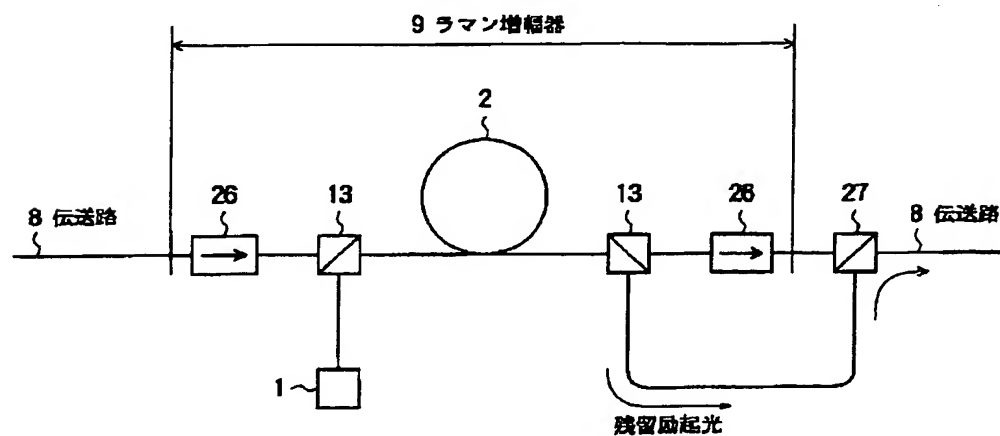
【図 25】



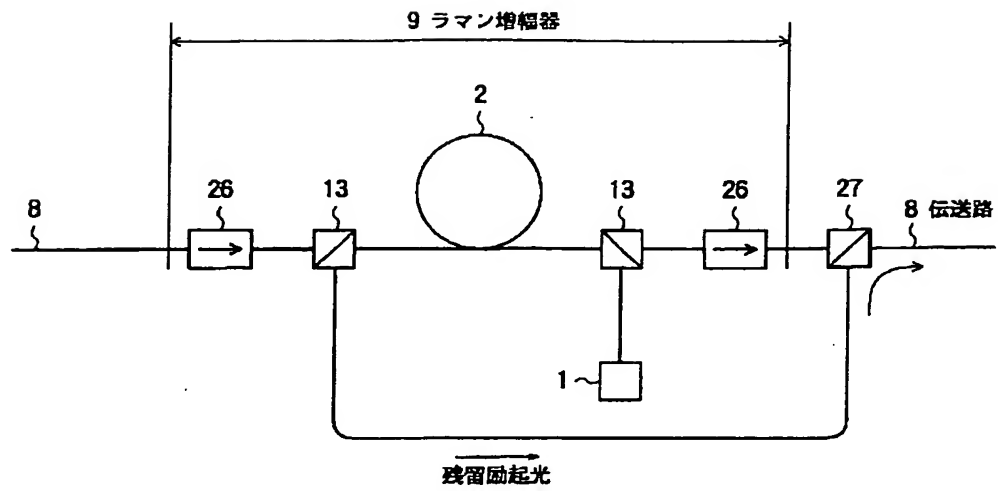
【図 29】



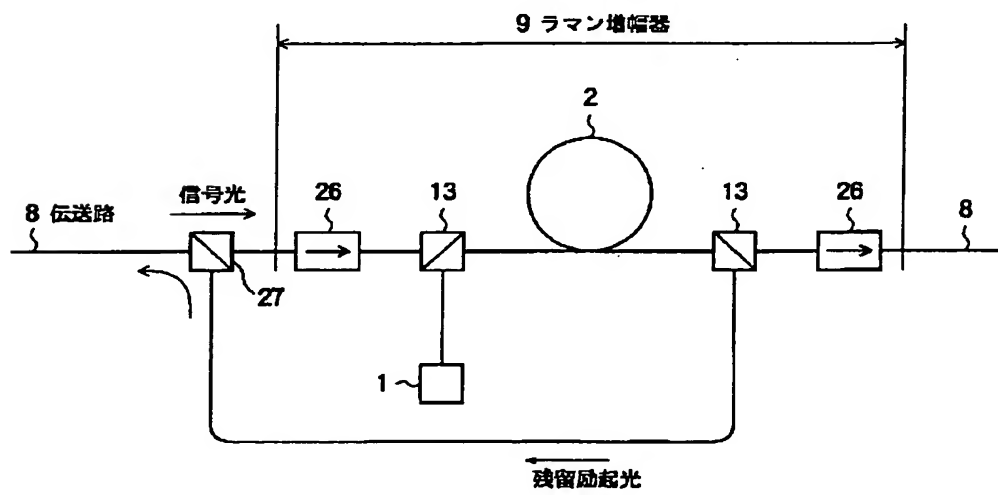
【図 30】



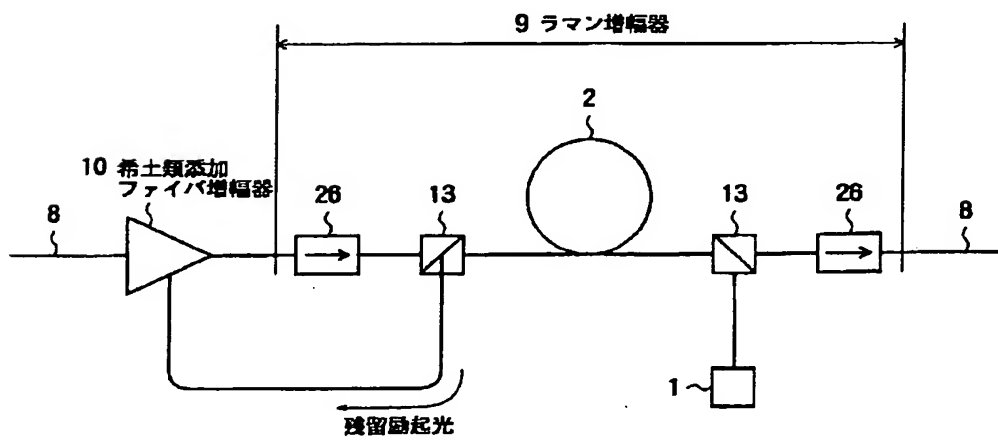
【図 3 1】



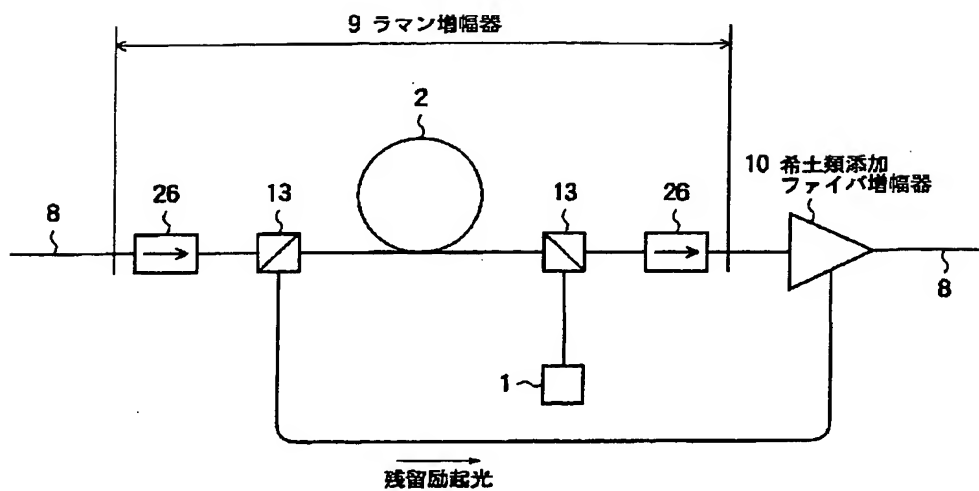
【図 3 2】



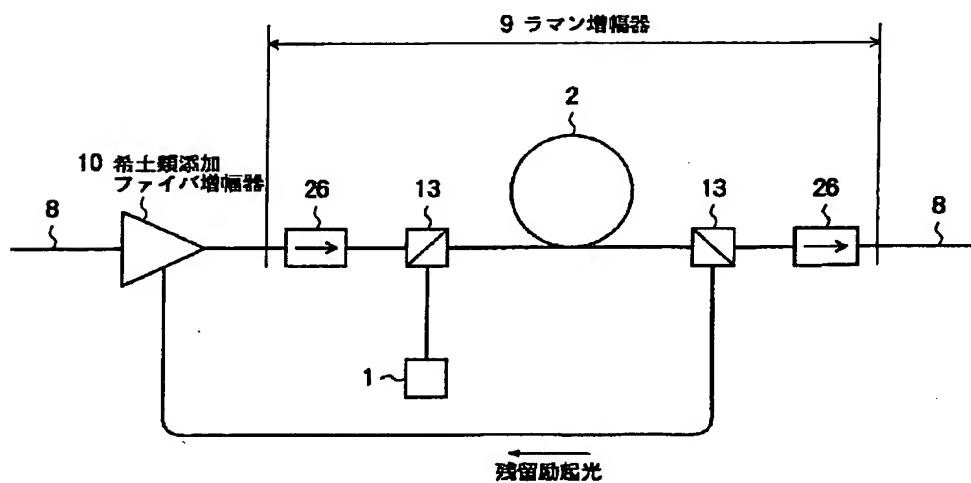
【図 3 3】



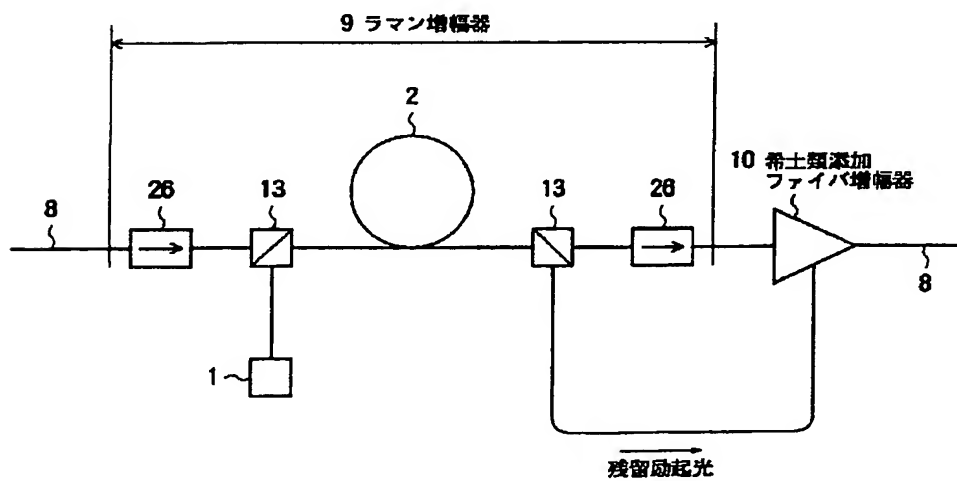
【図 3 4】



【図 3 5】

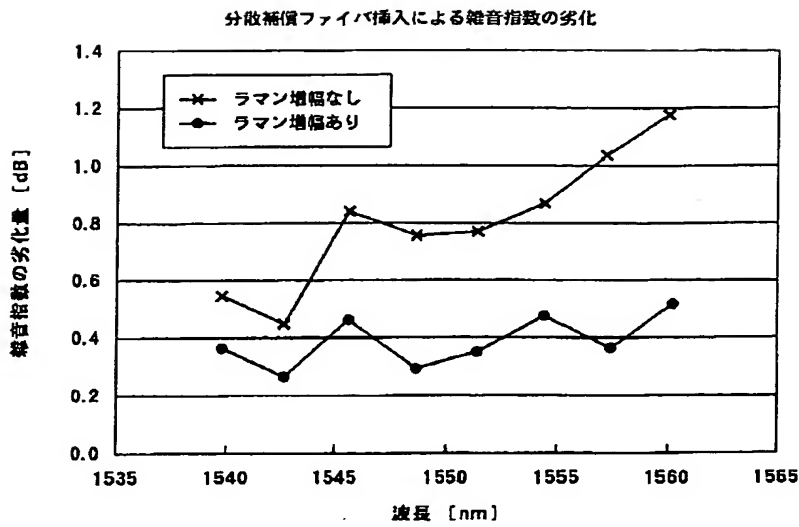


【図 3 6】

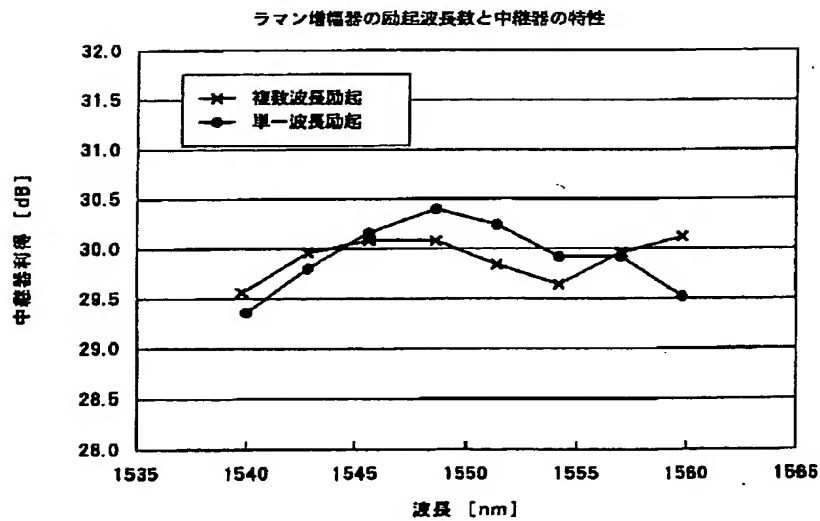




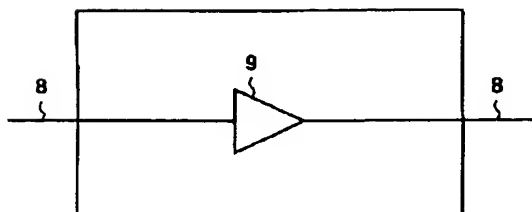
【図37】



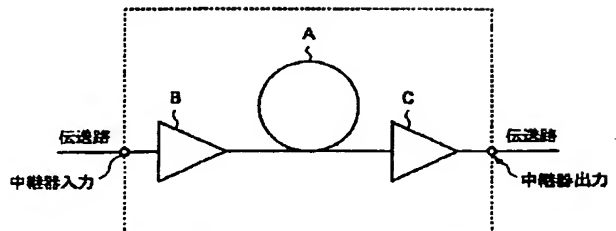
【図38】



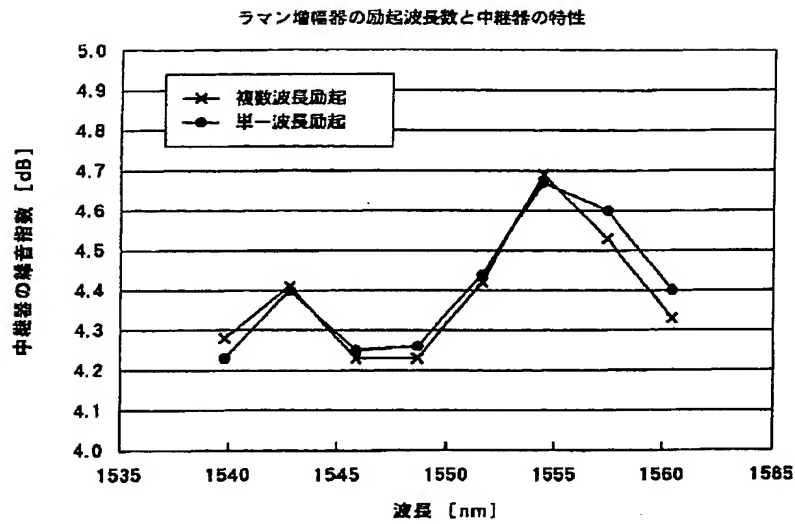
【図45】



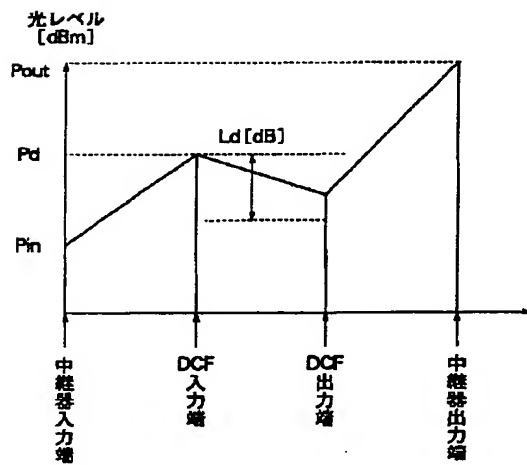
【図46】



【図39】



【図47】



# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2000-098433

(43)Date of publication of application : 07.04.2000

(51)Int.Cl. G02F 1/35  
H01S 5/026  
H01S 3/30  
H04B 10/17  
H04B 10/16

(21)Application number : 11-034833

(71)Applicant : FURUKAWA  
ELECTRIC CO  
LTD:THE

(22)Date of filing : 12.02.1999 (72)Inventor : EMORI  
YOSHIHIRO  
AKASAKA  
YOICHI  
NAMIKI SHU

(30)Priority

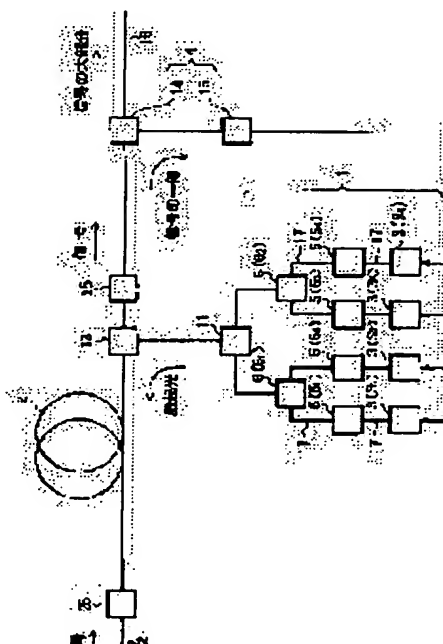
Priority number :	10208450	Priority date :	23.07.1998	Priority country :	JP
-------------------	----------	-----------------	------------	--------------------	----

## (54) RAMAN AMPLIFIER AND OPTICAL RELAY USING THE SAME

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a Raman amplifier in which required gain can be obtained, dependence on wavelength of gain can be reduced to such an extent that a gain flattening filter is not required, and which can be used in a band of EDFA.

SOLUTION: As a semiconductor laser 3, such a laser is used that it is a Fabry-Perot type and an external resonator for stabilizing oscillation wavelength such as a fiber grating is connected to it. Also, it is assumed that the central



*This Page Blank (uspto)*

**BEST AVAILABLE COPY**

wavelength of a laser is 6 nm or more to 35 nm or less, and difference between the maximum value of the central wavelength and the minimum value is less than 100 nm. The device has a means for detecting output power of each exciting light or a means for detecting signal light output power of a wavelength in which gain by each exciting light source is made maximum, and a means 4 for controlling a drive current of each exciting light source keeping power at a constant value. When the device is applied to a relay, the device has a means in which exciting light having shorter wavelength band than a signal wavelength band of the relay by 100 nm is made incident on DCF being a constituting element of an optical relay. Further the device has a means for monitoring a signal light between an amplifier 1 and an input of DCF and between an amplifier 2 and an output of DCF a means for adjusting the power of exciting light or the like.

---

#### LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's  
decision of rejection]

[Kind of final disposal of  
application other than the  
examiner's decision of rejection or  
application converted registration]

[Date of final disposal for  
application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against  
examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against  
examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2000 Japan Patent Office

This Page Blank (uspto)



**WHAT IS CLAIMED IS:**

[Claim 1] A Raman amplifier provided with a pumping light generating means (1) for generating a plurality of pumping lights, which synthesizes a plurality of pumping lights outputted from said  
5 pumping light generating means (1) and signal lights which are propagated to an optical fiber (2), and applies a Raman gain to the corresponding signal lights, wherein said pumping light generating means is composed of a Fabry-Perot type, DFB type, DBR type semiconductor laser or MOPA (3), the respective pumping lights  
10 have center wavelengths made different from each other, and the interval of the center wavelengths is made into 6nm or more or 35nm or less.

[Claim 2] The Raman amplifier as set forth in Claim 1, wherein with respect to a plurality of pumping lights, a difference in  
15 wavelength is 100nm or less between when the center wavelength is the maximum and when the center wavelength is the minimum.

[Claim 3] The Raman amplifier as set forth in Claim 1 or 2, wherein said pumping light generating means (1) is constructed so that it excites signals in two directions by causing pumping lights  
20 of wavelengths adjacent thereto to propagate through the optical fiber (2) in two directions differing from each other.

[Claim 4] The Raman amplifier as set forth in Claim 3, wherein said pumping light generating means (1) is constructed so that it divides a plurality of pumping lights into two groups and disposes  
25 the same, and simultaneously synthesizes the pumping lights in the respective groups so that pumping lights of adjacent wavelengths are not provided into the same group, and two pumping lights synthesized in the respective groups are caused to propagate through the optical fiber (2) in two directions differing from each  
30 other.

[Claim 5] The Raman amplifier as set forth in any one of Claims 1 through 4, further comprising an output light power controlling means (4) that controls power of respective pumping lights in said  
35 pumping light generating means (1) on the basis of results obtained by monitoring input light or output light, and holds the output light power at an appointed value.

[Claim 6] The Raman amplifier as set forth in any one of Claims

1 through 5, further comprising an output light power controlling means (4) that controls power of respective pumping lights in said pumping light generating means (1) on the basis of results obtained by monitoring output light, and flattens the wavelength dependency of the amplifier output.

[Claim 7] The Raman amplifier as set forth in Claim 5 or 6, wherein said output light power controlling means (4) divides monitor light, which is bifurcated from the output light, to wavelength light having a wavelength obtained by, respectively, adding approximately 100nm to the wavelengths of respective pumping lights, monitors the respective wavelength lights, and controls respective pumping light power of said pumping light generating means (1) so that the power of the respective wavelength lights are matched to each other.

[Claim 8] The Raman amplifier as set forth in Claim 5 or 6, wherein said output light power controlling means (4) distributes the monitor light, which is bifurcated from the output light into the same number as that of the pumping lights, monitors the respective wavelength lights by transmitting wavelength light obtained by, respectively, adding approximately 100nm to the wavelengths of the respective pumping lights through the same, and controls the respective pumping light power of the pumping light generating means (1) so that the power of the respective wavelength lights is matched to each other.

[Claim 9] The Raman amplifier as set forth in any one of Claims 1 through 8, further comprising an output light power controlling means (4) that monitors input light power and output light power, controls the respective pumping light power of said pumping light generating means (1) so that the ratio of the power is fixed, and holds the gain at an appointed value.

[Claim 10] The Raman amplifier as set forth in Claim 1 through 9, wherein said pumping light generating means (1) is constructed so that an external resonance unit (5) for stabilizing a wavelength such as a fiber grating is provided at the output side of a Fabry-Perot type semiconductor laser (3).

[Claim 11] The Raman amplifier as set forth in any one of Claims 1 through 10, wherein said pumping light generating means (1) is

constructed so that a polarization synthesizer (6), which polarizes and synthesizes the pumping lights is provided, at the output side of the Fabry-Perot type semiconductor laser (3).

5 [Claim 12] The Raman amplifier as set forth in any one of Claims 1 through 11, wherein said pumping light generating means (1) is constructed so that the same is provided with a plane light wave circuit type wavelength synthesizer whose principle is a Mach-Zehnder interferometer.

10 [Claim 13] The Raman amplifier as set forth in any one of Claims 1 through 12, further comprising a polarization plane turning means (7) that rotates the polarization plane by 90 degrees, wherein a plurality of pumping lights, which are generated by the pumping light generating means (1), and pumping lights, the polarization plane of which is orthogonal to said respective pumping lights whose  
15 polarization plane is turned by 90 degrees by said polarization plane turning means (7), exist in the optical fiber (2) at the same time.

[Claim 14] The Raman amplifier as set forth in any one of Claims 1 through 13, wherein the non-linear type refraction ratio  $n_2$  of  
20 the optical fiber (2) for amplification is  $3.5E-20[m^2/w]$ .

[Claim 15] The Raman amplifier as set forth in any one of Claims 1 through 14, wherein the optical fiber (2) for an amplifier is provided as a part of transmission lines.

[Claim 16] The Raman amplifier as set forth in any one of Claims  
25 1 through 15, wherein SMF and a fiber having dispersion of  $-20/ps/nm/km$  or less are used as the optical fiber (2) for amplification.

[Claim 17] The Raman amplifier as set forth in Claim 16, wherein  
30 pumping light is propagated from a fiber having a  $-20/ps/nm/km$  to the SMF.

[Claim 18] The Raman amplifier as set forth in any one of Claims 1 through 14, wherein the optical fiber (2) for amplification is independent from a transmission fiber that propagates signal light, and is provided as the Raman amplification fiber which can be  
35 inserted into the same transmission fiber.

[Claim 19] An optical relay inserted into an optical fiber transmission line (8), which compensates a loss in the same optical

fiber transmission line (8), including a Raman amplifier (9) described in any one of Claims 1 through 18, wherein a loss in said optical fiber transmission line (8) is compensated by the same Raman amplifier (9).

5 [Claim 20] The optical relay as set forth in Claim 19, wherein residual pumping light in the Raman amplifier (9) is made incident into the optical fiber transmission line (8), and a Raman amplification effect in the optical fiber transmission line (8) is utilized.

10 [Claim 21] The optical relay as set forth in Claim 19, wherein a rare-earth doped fiber amplifier (10) is provided before or after the Raman amplifier (9) or at both sides thereof.

[Claim 22] The optical relay as set forth in Claim 21, wherein the residual pumping light of the Raman amplifier (9) is utilized  
15 as pumping light of the rare earth doped fiber amplifier (10).

[Claim 23] An optical relay inserted into the optical fiber transmission line (8), which compensates wavelength dispersion in said optical fiber transmission line (8), further including a Raman amplifier (9) described in any one of Claims 1 through 18, wherein  
20 the same compensates wavelength dispersion in the optical fiber transmission line (8) by using a dispersion compensating fiber in the optical fiber (2), and compensates a part or the whole of the loss in the optical fiber transmission line (8) and optical fiber (2).

25 [Claim 24] The optical relay as set forth in Claim 21, wherein the residual pumping light of the Raman amplifier (9) is made incident into the optical fiber transmission line (8), and a Raman amplification effect in the optical fiber transmission line (8) is utilized.

30 [Claim 25] The optical relay as set forth in Claim 23, wherein the rare-earth doped fiber amplifier (10) is provided before or after the Raman amplifier (9) or at both sides thereof.

[Claim 26] The optical relay as set forth in Claim 25, wherein the residual pumping light of the Raman amplifier is utilized as  
35 pumping light of the rare earth doped fiber amplifier (10).

[Claim 27] The optical relay as set forth in any one of Claims 23 through 26, further including a controlling means that

compensates a fluctuation in the input level to the optical fiber (2) being a dispersion compensating fiber and a fluctuation in loss in the same fiber (2) by Raman amplification in the same optical fiber (2), and holds an output from the corresponding optical fiber (2) at an appointed value.

[Claim 28] The optical relay as set forth in any one of Claims 23 through 26, further including a controlling means that compensates a loss or a gain in the optical fiber (2) being the dispersion compensating fiber by Raman amplification and holds the same at a fixed level.

[Claim 29] The optical relay as set forth in any one of Claims 21, 22, 25, 26, 27 and 28, wherein the gain of the rare-earth doped fiber amplifier (10) is kept at a fixed level and the gain of the relay is adjusted by the gain of the Raman amplifier (9).

[Claim 30] The optical relay as set forth in any one of Claims 21, 22, 25, 26, 27, 28 and 29, wherein the wavelength dependency of the gain of the rare-earth doped fiber amplifier (10) is compensated by the wavelength dependency of the gain of the Raman amplifier (9).

[Claim 31] An optical relay inserted into an optical fiber transmission line (8), which compensates a loss in the same optical fiber transmission and wavelength dispersion in said optical fiber transmission line (8), further including a Raman amplifier (9) in which the wavelength of the pumping light is single, wherein a rare-earth doped fiber amplifier (10) is provided before or after said Raman amplifier (9) or at both sides thereof, and a dispersion compensating fiber is used for an optical fiber (2) for amplification of the Raman amplifier (9).

[Claim 32] The optical relay as set forth in Claim 31, wherein the residual pumping light of the Raman amplifier (9) is utilized as pumping light of the rare-earth doped fiber amplifier (10).

[Claim 33] The optical relay as set forth in Claim 31 or 32, further including a controlling means that compensates a fluctuation in an input level to an optical fiber (2) for Raman amplification, which is a dispersion compensating fiber, and a fluctuation in loss in said fiber by Raman amplification in said fiber (2), and holds an output of the corresponding optical fiber

(2) at an appointed value.

[Claim 34] The optical relay as set forth in Claim 31 or 32, further including a controlling means that compensates a loss or a gain in the optical fiber (2) for Raman amplification, which is a dispersion compensating fiber, by Raman amplification in said optical fiber (2), and holds the same at an appointed value.

[Claim 35] The optical relay as set forth in Claim 31 or 32, wherein the gain of the rare-earth doped fiber amplifier (10) is held at a fixed level and the gain of the relay is adjusted by the gain of the Raman amplifier (9).

[Detailed description of the invention]

[0001]

### ***Field of the Invention***

The present invention relates to a Raman amplifier that can be used for amplification of signal light in various types of optical communications systems, and an optical relay that is provided with the Raman amplifier, and in particular, which are suitable for amplification of wavelength division synthesized light.

[0002]

### ***Prior arts***

Almost all the optical amplifiers that are used in present optical fiber communications systems are rare-earth doped fiber amplifiers. In particular, Er-doped optical fiber amplifiers (hereinafter called "EDFA") that employ a fiber to which erbium (Er) is doped have been frequently used. However, the practical gain wavelength band of the EDFA is from 1530nm to 1610nm (Reference: Electron, Lett. Vol. 33, no. 23, pp.1967-1968). Further, the EDFA has a wavelength dependency in the gain. Where the EDFA is used for wavelength division synthesized light, a difference in gain is produced in the wavelength of signal light. Fig. 23 shows an example of gain wavelength dependency of the EDFA. However, a fluctuation in gain is large particularly with respect to wavelengths of 1540nm or less and 1560nm or more. Therefore, in order to obtain a fixed gain (in most cases, the deviation in gain is 1dB or less) in the entire band of such wavelengths, a gain flattening filter is used.

[0003]

The gain flattening filter is designed so that a loss is increased at a range of a wavelength having a large gain, and a loss profile is almost the same as a gain profile. However, since in the EDFA the gain profile changes as shown by curves "a", "b" and "c" as the size of the average gain changes as shown in Fig. 24, the optimal loss profile of the gain flattening filter also changes in this case. Therefore, where flattening is achieved by a gain compensating filter whose loss profile is fixed, the flattening degree deteriorates as the gain of the EDFA changes.

[0004]

On the other hand, a Raman amplifier that utilizes Raman scattering of an optical fiber is available as an optical amplifier (Reference: Nonlinear Fiber Optics, Academic Press). The Raman amplifier has a peak in gain at a lower frequency by approximately 13Thz than the frequency of the pumping light. In the following description, a case where a pumping light of a 1400nm band is used is assumed, wherein the frequency lower by approximately 13Thz is expressed to be a wavelength longer by approximately 100nm. Fig. 25 shows a wavelength dependency of a gain when a pumping light whose center wavelength is 1450nm is used. At this time, the peak of the gain is 1550nm, and the band width in which the deviation in the gain is 1dB or less is 20nm or so. Since the Raman amplifier amplifies any optical wavelength as far as a pumping light source is prepared, the use thereof in a wavelength band that cannot be amplified by the EDFA is taken into consideration. On the other hand, the Raman amplifier is not used in the gain band of the EDFA. This is because the Raman amplifier requires further large pumping light power in order to obtain a gain equivalent to that of the EDFA. In addition, if an attempt is made to increase the gain by making a pumping light of large power incident into an optical fiber, induction Brillouin scattering is generated by the pumping light to increase noise. Therefore, it becomes difficult to utilize the Raman amplifier. Japanese Unexamined Patent Publication No. Hei-2-12986 discloses a technology that suppresses the induction Brillouin scattering by a Raman amplifier.

[0005]

Also, the Raman amplifier has a polarization dependency in

gain, and the same amplifier brings about an action of amplification only for components, which are coincident with polarization of the pumping light, of the polarization components contained in signal light. Therefore, a countermeasure that reduces instability of the gain due to polarization dependency is requested. However, it is considered that a fiber, which preserves a plane of polarization, is used as an amplification fiber or a pumping light source whose polarization is random is used.

[0006]

Also, the Raman amplifier is required to expand the gain band. It is considered that a plurality of pumping lights having different wavelengths are used. (Reference: OFC98, PD-6). However, no measure has been taken in view of reducing the gain deviation to 1dB or less.

[0007]

On the other hand, there is an optical relay that simultaneously compensates a loss in transmission and dispersion in wavelength, which are generated in an optical fiber transmission line. The optical relay is constructed, in which an Er-doped fiber amplifier (EDFA) and a dispersion compensating fiber (DCF) that compensates wavelength dispersion are combined. Fig. 46 is a conventional example, which is constructed so that a dispersion compensating fiber A is disposed between two Er-doped fiber amplifiers B and C. The first Er-doped fiber amplifier B amplifies signal light of a low level to a comparatively high level and is featured in that the noise characteristics are excellent. The second Er-doped fiber amplifier C amplifies light signals, which have attenuated in the dispersion compensating fiber A, to a high level again, and is featured in that the output level is high.

[0008]

However, with respect to the above-described optical relay, it is necessary to adequately set each of the relay input levels, relay output levels and amount of dispersion compensation (loss in the dispersion compensating fiber A) when designing the same, and there is a limitation which is the existence of the upper limit in the input light level of the dispersion compensating fiber A. This is because if the input power into the dispersion compensating



fiber A is made large, an influence of a nonlinear effect is increased in the dispersion compensating fiber A, and the transmission waveform remarkably deteriorates. With respect to the upper limit of the input power into the dispersion compensating fiber A, a self-phase modulation effect (SPM) becomes a determination factor when carrying out a single wave transmission, and a mutual phase modulation effect (XPM) becomes a determination factor when carrying out a WDM transmission. As described above, it is necessary to design a relay that is excellent in connection with the gain flattening degree and noise characteristics under these conditions, taking various factors of fluctuations into consideration.

[0009]

Fig. 47 shows an optical level diaphragm in a relay. A gain  $G1$  [dB] of the first Er-doped fiber amplifier B is set to a difference between the input level  $P_{in}$  [dB] of the relay and the upper limit value  $P_d$  [dB] of input into the dispersion compensating fiber A. The gain  $G2$  [dB] of the second Er-doped fiber amplifier C is set to  $G_r + L_d - G1$  [dB] on the basis of the loss  $L_d$  [dB] in the dispersion compensating fiber A, gain  $G_r$  [dB] of the relay, and gain  $G1$  [dB] of the first Er-doped fiber amplifier B. Since these design parameters become different from each other system by system, the  $G1$  [dB] and  $G2$  [dB] differ system by system. Therefore, it is necessary to re-design the Er-doped fiber amplifiers B and C in respective systems. The noise characteristics in such systems have a deep connection with the loss  $L_d$  [dB] in the dispersion compensating fiber, wherein it has been publicly known that the greater the loss is, the worse the noise characteristics become. Also, at present, unevenness in the loss in transmission lines and loss of dispersion compensating fiber A is compensated by changing the gains of the Er-doped fiber amplifiers B and C, or is adjusted by providing a variable attenuator, etc. However, there are advantages and disadvantages since the former one deteriorates the gain flattening degree and the latter one deteriorates the noise characteristics.

[0010]

### ***Objects to be solved by the invention***

Although Er-doped optical fiber amplifiers have prevailed in optical transmissions, there are some points to be solved, in the Er-doped optical fiber amplifiers. Also, with respect to Raman amplifiers, the output of general semiconductor lasers is 100 through 200mW, the gain obtained is comparatively small, and the gain is sensitive in regard to changes in power and wavelength of pumping light. Therefore, where a Fabry-Perot type semiconductor laser having a comparatively high output is used, there are some problems, that is, noise due to fluctuations in the gain, which result from the mode hop, becomes remarkable, or although it is necessary to change the drive current of the pumping laser when adjusting the size of gain, the fluctuation in the center wavelength is 15nm or so at maximum when the drive current is changed, and the wavelength dependency of the gain may greatly change. Such a shift of the center wavelength is an unfavorable point which results in a change in the coupling loss of a WDM coupler that synthesizes pumping light. In addition, the optical relay also has a problem, that is, it is necessary to re-design Er-doped fiber amplifiers B and C in each system. Further, deterioration of the noise characteristics due to insertion of a dispersion compensating optical fiber is an unavoidable problem in the present system.

[0011]

### ***Means for Solving the Problems***

It is therefore an object of the invention to provide a Raman amplifier that is able to obtain a necessary gain, is able to decrease the wavelength dependency to such a degree that no gain flattening filter may be used, and can be used in a band of EDFA. It is another object of the invention to provide an optical relay that is able to compensate unevenness of the losses in transmission lines and DCF without any necessity of re-designing an Er-doped fiber amplifier (EDFA) system by system and deteriorating the characteristics of the optical relay, by applying the above-described Raman amplifier to an optical amplifier which is composed of the EDFA and a dispersion compensating optical fiber. And, Raman amplification of the DCF means a reduction in the deterioration

of the noise characteristics resulting from the DCF insertion, which is unavoidable in the prior arts.

[0012]

As shown in Fig. 1, Fig. 2 or Fig. 3, a Raman amplifier  
5 described in Claim 1 of the invention is provided with a pumping  
light generating means 1 for generating a plurality of pumping  
lights, and the same Raman amplifier synthesizes a plurality of  
pumping lights outputted from the pumping light generating means  
1 and signal lights which are transmitted to an optical fiber 2,  
10 and applies a Raman gain to the corresponding signal lights, wherein  
the pumping light generating means 1 is composed of a Fabry-Perot  
type, DFB type, DBR type semiconductor laser or MOPA 3, the  
respective pumping lights have the center wavelengths made  
different from each other, and the interval of the center  
15 wavelengths is made into 6nm or more or 35nm or less.

[0013]

The Raman amplifier described in Claim 2 of the invention  
is featured in that, with respect to a plurality of pumping lights,  
a difference in wavelength is 100nm or less between when the center  
20 wavelength is the maximum and when the center wavelength is the  
minimum.

[0014]

The Raman amplifier described in Claim 3 of the invention  
is featured, as shown in Fig. 3, in that the pumping light generating  
25 means 1 is constructed so that it excites signals in two directions  
by causing pumping lights of wavelengths adjacent thereto to  
propagate through the optical fiber 2 in two directions differing  
from each other.

[0015]

30 The Raman amplifier described in Claim 4 of the invention  
is featured, as shown in Fig. 3, in that the pump light generating  
means 1 is constructed so that it divides a plurality of pumping  
lights into two groups and disposes the same, and simultaneously  
synthesizes the pumping lights in the respective groups so that  
35 pumping light of adjacent wavelengths does not enter the same group,  
and two pumping lights synthesized in the groups are caused to  
propagate through the optical fiber 2 in two directions differing

from each other.

[0016]

As shown in Fig. 26 or Fig. 27, the Raman amplifier described in Claim 5 of the invention further comprises an output light power  
5 controlling means 4 that controls power of respective pumping lights in the pumping light generating means 1 on the basis of results obtained by monitoring input light or output light, and holds the output light power at an appointed value.

[0017]

10 As shown in Fig. 4 or Fig. 5, the Raman amplifier described in Claim 6 of the invention further comprises an output light power controlling means 1 that controls power of respective pumping lights in the pumping light generating means 1 on the basis of results obtained by monitoring output light including a signal  
15 light that received Raman amplification, and flattens the wavelength dependency of the amplifier output.

[0018]

As shown in Fig. 4, the Raman amplifier described in Claim 7 of the invention is featured in that the output light power  
20 controlling means 4 divides monitor light, which is bifurcated from the output light, to wavelength light having a wavelength obtained by, respectively, adding approximately 100nm to the wavelengths of respective pumping lights, monitors the respective wavelength lights, and controls power of the respective pumping lights in the  
25 pumping light generating means 1 so that the power of the respective wavelength lights is matched to each other.

[0019]

As shown in Fig. 5, the Raman amplifier described in Claim 8 of the invention is featured in that the output light power  
30 controlling means 4 distributes the monitor light, which is bifurcated from the output light into the same number as that of the pumping lights, monitors the respective wavelength lights by transmitting wavelength light obtained by, respectively, adding approximately 100nm to the wavelengths of the respective pumping  
35 lights through the same, and controls the respective pumping light power of the pumping light generating means 1 so that the power of the respective wavelength lights is matched to each other.

[0020]

The Raman amplifier described in Claim 9 of the invention further comprises, as shown in Fig. 28, an output light power controlling means 4 that monitors input light power and output light power, controls the respective pumping light power of the pumping light generating means 1 so that the ratio of the power is fixed, and holds the gain at an appointed value.

[0021]

As shown in Fig. 1, Fig. 2 or Fig. 3, the Raman amplifier described in Claim 10 of the invention is featured in that the pumping light generating means 1 is constructed so that an external resonance unit 5 for stabilizing a wavelength such as a fiber grating is provided at the output side of a Fabry-Perot type semiconductor laser 3.

[0022]

As shown in Fig. 1, Fig. 2 or Fig. 3, the Raman amplifier described in Claim 11 of the invention is featured in that the pumping light generating means 1 is constructed so that a polarization synthesizer 6 polarizes and synthesizes the pumping lights, at the output side of the Fabry-Perot type semiconductor laser 3.

[0023]

As shown in Fig. 1, Fig. 2 or Fig. 3, the Raman amplifier described in Claim 12 of the invention is featured in that the pumping light generating means 1 is constructed so that a Fabry-Perot type, DFB type, DBR type semiconductor lasers of a plurality of wavelengths or a MOPA constructed by providing a plane light wave circuit type wavelength synthesizer whose principle is a Mach-Zehnder interferometer.

[0024]

As shown in Fig. 6(a) and Fig. 6(b), the Raman amplifier described in Claim 13 of the invention further comprises a polarization plane turning means 7 that rotates the polarization plane by 90 degrees, is featured in that a plurality of pumping lights, which are generated by the pumping light generating means 1, and pumping lights, the polarization plane of which is orthogonal to the respective pumping lights that are generated by the

polarization plane turning means 7, exist in the optical fiber 2 at the same time.

[0025]

5 The Raman amplifier described in Claim 14 of the invention is featured in that the non-linear type refraction ratio  $n_2$  of the optical fiber 2 for amplification is  $3.5E-20[m^2/w]$ .

[0026]

10 The Raman amplifier described in Claim 15 of the invention is featured in that the optical fiber 2 for amplification is provided as a part of the transmission lines.

[0027]

15 In the Raman amplifier described in Claim 16 of the invention, the amplification fiber 2 is used as a transmission line, and the same is constructed by connecting SMF and a fiber having dispersion of  $-20[ps/nm/km]$  or less.

[0028]

20 The Raman amplifier described in Claim 17 of the invention is featured in that the amplification fiber 2 is used as a transmission line, and the same is constructed by connecting SMF to a fiber having a dispersion of  $-20ps/nm/km$ , wherein pumping light is propagated from the fiber having a dispersion of  $-20ps/nm/km$  or less to the SMF.

[0029]

25 The Raman amplifier described in Claim 18 of the invention is featured in that the optical fiber 2 for amplification is independent from a transmission fiber that transmits signal light, and is provided as the Raman amplification fiber which can be inserted into the same transmission fiber.

[0030]

30 As shown in Fig. 7, the optical relay described in Claim 19 of the invention is an optical relay inserted into an optical fiber transmission line 8, which compensates a loss in the same optical fiber transmission line 8, including a Raman amplifier 9 described in any one of Claims 1 through 14, is featured in that a loss in  
35 the optical fiber transmission line 8 is compensated by the same Raman amplifier 9.

[0031]

As shown in Fig. 29 through Fig. 32, the optical relay described in Claim 20 of the invention is featured in that residual pumping light in the Raman amplifier 9 is made incident into the optical fiber transmission line 8, and a Raman amplification effect  
5 in the optical fiber transmission line 8 is utilized.

[0032]

As shown in Fig. 8, the optical relay described in Claim 21 of the invention is featured in that a rare-earth doped fiber amplifier 10 is provided before or after the Raman amplifier 9 or  
10 at both sides thereof.

[0033]

As shown in Fig. 33 through Fig. 36, the optical relay described in Claim 22 of the invention is featured in that the residual pumping light of the Raman amplifier 9 is utilized as  
15 pumping light of the rare-earth doped fiber amplifier 10.

[0034]

The optical relay described in Claim 23 of the invention is an optical relay inserted into the optical fiber transmission line 8, which compensates wavelength dispersion in the optical fiber  
20 transmission line 8, further includes a Raman amplifier 9 described in any one of Claims 1 through 14, and is featured in that the same compensates wavelength dispersion in the optical fiber transmission line 8 by using a dispersion compensating fiber in the optical fiber 2, and compensates a part or the whole of the  
25 loss in the optical fiber transmission line 8 and optical fiber 2 for amplification.

[0035]

As shown in Fig. 29 through Fig. 32, the optical relay described in Claim 24 of the invention is featured in that the  
30 residual pumping light of the Raman amplifier 9 is made incident into the optical fiber transmission line 8, and a Raman amplification effect in the optical fiber transmission line 8 is utilized.

[0036]

35 As shown in Fig. 8, the optical relay described in Claim 25 of the invention is featured in that the rare-earth doped fiber amplifier 10 is provided before or after the Raman amplifier 9 or

at both sides thereof.

[0037]

As shown in Fig. 33 through Fig. 36, the optical relay described in Claim 26 of the invention is featured in that the residual pumping light of the Raman amplifier is utilized as pumping light of the rare-earth doped fiber amplifier 10.

[0038]

As shown in Fig. 9, the optical relay described in Claim 27 of the invention further includes a controlling means that compensates a fluctuation in the input level to the optical fiber 2 being a dispersion compensating fiber and a fluctuation in the loss in the same fiber 2 by Raman amplification in the same optical fiber 2, and holds an output from the corresponding optical fiber 2 at an appointed value.

[0039]

As shown in Fig. 10, the optical relay described in Claim 28 of the invention further includes a controlling means that compensates a loss or a gain in the optical fiber 2 being the dispersion compensating fiber by Raman amplification and holds the same at a fixed level.

[0040]

The optical relay described in Claim 29 of the invention is featured in that the gain of the rare-earth doped fiber amplifier 10 is kept at a fixed level and the gain of the relay is adjusted by the gain of the Raman amplifier 9.

[0041]

As shown in Fig. 11, the optical relay described in Claim 30 of the invention is featured in that the wavelength dependency of the gain of the rare-earth doped fiber amplifier 10 is compensated by the wavelength dependency of the gain of the Raman amplifier 9.

[0042]

As shown in Fig. 8, an optical relay described in Claim 3 of the invention, inserted into an optical fiber transmission line 8, which compensates wavelength dispersion in the optical fiber transmission line 8, further including a Raman amplifier in which the wavelength of the pumping light is single, is featured in that



a rare-earth doped fiber amplifier 10 is provided before or after the Raman amplifier 9 or at both sides thereof, and a dispersion compensating fiber is used for an optical fiber 2 for amplification of the Raman amplifier 9.

5 [0043]

The optical relay described in Claim 32 of the invention is featured, as shown in Fig. 33 through Fig. 36, in that the residual pumping light of the Raman amplifier 9 is utilized as pumping light of the rare-earth doped fiber amplifier 10.

10 [0044]

As shown in Fig. 9, the optical relay described in Claim 33 further includes a controlling means that compensates a fluctuation in an input level to an optical fiber 2 for Raman amplification, which is a dispersion compensating fiber, and a fluctuation in loss in the same fiber 2 by Raman amplification in the same fiber 2, and holds an output of the corresponding optical fiber 2 at an appointed value.

[0045]

As shown in Fig. 10, the optical relay described in Claim 20 34 of the invention further includes a controlling means that compensates a loss or a gain in the optical fiber 2 for Raman amplification, which is a dispersion compensating fiber, by Raman amplification in the same optical fiber 2, and holds the same at an appointed value.

25 [0046]

As shown in Fig. 11, the optical relay described in Claim 35 of the invention is featured in that the gain of the rare-earth doped fiber amplifier 10 is held at a fixed level and the gain of the relay is adjusted by the gain of the Raman amplifier 9.

30 [0047]

Next, a description is given of a Raman amplifier according to the invention and an optical relay provided with the Raman amplifier. As shown in Figs. 1, 2, and 3, where, in the Raman amplifier described in Claim 1 of the invention, a small-sized and 35 Fabry-Perot type semiconductor laser 3 having comparatively high output is used in the pumping light generating means 1, it is possible to obtain a comparatively high gain. Also, since the

oscillation wavelength has a wide stroke width in the Fabry-Perot type semiconductor laser 3, almost all induction Brillouin scattering due to pumping light can be prevented from occurring. Where a DBF type or DBR type semiconductor laser or a MOPA is used, since the range of fluctuation in the oscillation wavelength is comparatively narrow, the gain profile does not change, as a result of the drive conditions. In addition, with modulation applied, it is possible to prevent the induction Brillouin scattering from occurring.

10 [0048]

Further, by making the spacing of the center wavelength of the pumping light into 6nm or more but 35nm or less, it is possible to make the wavelength dependency of the gain small to such a degree that no gain flattening filter is required. The reason why the spacing of the center wavelength of the pumping light is made into 6nm or more is to enable the oscillation band width of a Fabry-Perot type semiconductor laser 3 to which an external resonance unit 5 having a narrow reflection band width is connected to be approximately 3nm as shown in Fig. 12 and a WDM coupler 11 (Fig. 1, Fig. 2 and Fig. 3) to synthesize the pumping light to be caused to have some allowance with respect to the wavelength spacing between the pumping lights to improve the synthesizing efficiency. The WDM coupler 11 is designed so that lights of different wavelengths are inputted from separate ports, and the incident lights are coupled to an output port without receiving any loss. However, with respect to light of an intermediate wavelength of the designed wavelengths, the loss is increased even if either one of the ports is used. For example, in a certain WDM coupler 11, the width of the wavelength band in which the loss is increased was 3nm. Therefore, 6nm that is obtained by adding 3nm to the band width of a semiconductor laser 3 as shown in Fig. 12 is adequate as the lower limit of the spacing of the center wavelength of pumping light so that a band of the semiconductor lasers 3 is not included in this band. On the other hand, if the spacing of the center wavelength of the semiconductor laser 3 as shown in Fig. 13(a) is made into 35nm or more, a valley is produced in the gain at an intermediate portion of Raman gain band, which is obtained by

pumping lights of adjacent wavelengths, wherein the gain flattening degree is worsened. This results from that, with respect to a Raman gain obtained by one pumping light, the gain is reduced to half at a point far from 15nm through 20nm from the gain peak wavelength.

5 Therefore, by making the spacing of the center wavelength of the pumping light into 6nm or more but 35nm or less, it is possible to make the wavelength dependency of the gain small to such a degree that no gain flattening filter is required.

[0049]

10 In a Raman amplifier described in Claim 2 of the invention, in order to make a difference between the maximum value of the center wavelength of pumping light and the minimum value thereof into 100nm or less, it is possible to prevent the waveform of signal light from deteriorating by preventing the pumping light and signal light  
15 from overlapping each other. Since the wavelength of the pumping light is near the wavelength of the signal light, this results in deterioration of the waveform of the signal light. Therefore, it is necessary to select the wavelength of pumping lights and that of signal light so that the wavelengths do not overlap each other.  
20 However, if the difference between the maximum value of the center wavelength of pumping light and the minimum value thereof is made into 100nm or less in a case where the pumping light is in a band of 1.4 $\mu$ m, as shown in Fig. 14, a difference between the center wavelength of a gain which is produced by one pumping light and  
25 the wavelength of the pumping light is approximately 100nm. Therefore, it is possible to prevent the wavelength of the pumping light and that of the signal light from overlapping each other.

[0050]

Since the Raman amplifier described in Claims 3 and 4 of the  
30 invention is constructed so that pumping lights of adjacent wavelengths are caused to propagate in two directions different from each other through an optical fiber 2 and signal lights are excited bidirectionally, it is possible to slacken the wavelength characteristics that are requested for a WDM coupler 11 shown in  
35 Fig. 1, Fig. 2 and Fig. 3. As shown in Fig. 15, this is because, although the center wavelengths become  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ , and  $\lambda_4$  in all the pumping lights included in the two directions and the spacing

thereof is 6nm or more but 35nm or less, as regards only one-direction pumping lights, the center wavelengths become  $\lambda_1$  and  $\lambda_3$ , and  $\lambda_2$  and  $\lambda_4$ , wherein the spacing of the wavelengths is doubled, and the characteristics requested for the WDM coupler 11 are caused to have some allowance.

[0051]

The Raman amplifier described in Claim 5 of the invention monitors input light into the Raman amplifier and output light therefrom, controls respective pumping light power of the pumping light generating means 11 on the basis of the results thereof, and is provided with a controlling means 4 that holds the output light power of the Raman amplifier on an appointed value. Therefore, it is possible to obtain a fixed output, not dependent upon a fluctuation in the input signal power into the Raman amplifier and a loss of a Raman amplification fiber.

[0052]

Since the Raman amplifier described in Claim 6 of the invention is provided with an output light power controlling means 4 for flattening the Raman gain, the gain can be flattened. In particular, the Raman amplifiers described in Claims 7 and 8 monitor, as shown in Fig. 16(a) and Fig. 16(b), the light of a wavelength that is obtained by adding approximately 100nm to the wavelength of respective pumping lights and control the power of the respective pumping lights so that the power of the wavelengths is matched to each other. Therefore, it is possible to flatten the gain. Also, in a Raman amplifier to which a fiber grating (external resonance unit 5) for stabilizing the wavelength, which is described later, is connected, since a change in the center wavelength due to a change in the drive current can be suppressed, it can be used as a means for enabling control of the gain.

[0053]

Since the Raman amplifier described in Claim 9 of the invention monitors the input signal power and output signal power, controls the pumping light power so that the ratio thereof becomes fixed, and is provided with a controlling means 4 that holds the gain of the Raman amplifier at a fixed value, it is possible to obtain a fixed gain, not dependent upon a fluctuation in the input

signal power into the Raman amplifier and a loss of a Raman amplification fiber.

[0054]

In the Raman amplifier described in Claim 10 of the invention,  
5 since an external resonance unit 5 for stabilizing a wavelength  
such as a fiber grating is provided at the output side of a  
Fabry-Perot type semiconductor laser 3, it is possible to suppress  
noise resulting from a fluctuation in gain, which results from a  
mode hop of the Fabry-Perot type semiconductor laser 3. Also, if  
10 the external resonance unit 5 for stabilizing a wavelength is  
connected to the semiconductor laser 3, this results in a narrowing  
of the wavelength band as regards one pumping light source. However,  
since it is possible to narrow the spacing between wavelengths when  
synthesizing by a WDM coupler 11 (Fig. 1, 2 and 3), finally, a pumping  
15 light can be obtained at a higher output in a wide band.

[0055]

Since, in the Raman amplifier described in Claim 11 of the  
invention, pumping lights of the semiconductor laser 3 are  
polarized, synthesized and used wavelength by wavelength, the  
20 polarization dependency of gain can be solved, and simultaneously,  
it is possible to increase the pumping light power in the Raman  
amplification. Since a gain can be obtained in only components,  
which are coincident with the polarization of the pumping lights,  
in the Raman amplification, the gain may fluctuate due to a  
25 fluctuation in relative polarization of signal light and pumping  
light where the pumping light is of linear polarization and the  
amplification fiber is not a polarization holding fiber. However,  
if the pumping light source of the linear polarization is  
synthesized so that the plane of polarization is made orthogonal  
30 to each other, the polarization dependency of the gain can be solved,  
and at the same time, the pumping light power inputted into a fiber  
can be increased.

[0056]

In the Raman amplifier described in Claim 12 of the invention,  
35 since a plane light wave circuit type wavelength synthesizer whose  
principle is a Mach-Zehnder type interferometer is used as a means  
for synthesizing a Fabry-Perot type, DFB type, DBR type

semiconductor lasers of a plurality of wavelengths or MOPA thereof,  
it is possible to synthesize wavelengths at a remarkably low loss  
in a case of synthesizing a number of Fabry-Perot type semiconductor  
lasers of a plurality of wavelengths, wherein it is possible to  
5 obtain pumping light of high output.

[0057]

The Raman amplifier described in Claim 13 of the invention  
is provided with a polarization plane turning means 7 that turns  
the plane of polarization by 90 degrees as shown in Fig. 6, and  
10 is constructed so that a plurality of pumping lights generated by  
the pumping light generating means 1 and pumping lights whose planes  
of polarization are orthogonal thereto coexist at the same time,  
it is possible to obtain a fixed gain at all times in principle  
even if the plane of polarization of the signal light is of any  
15 type. Since the band of the Raman amplification depends on the band  
of the pumping light, synthesizing of pumping lights of a plurality  
of wavelengths by the WDM coupler 11 makes the pumping light wide,  
which is incident into the optical fiber 2 for amplification, and  
resultantly, the Raman gain can be made wide.

20 [0058]

Since an optical fiber whose non-linear type refractive  
index  $n_2$  is  $3.5 \times 10^{-16}$  through  $20 \times 10^{-16}$  [m<sup>2</sup>/W] or more is used as the optical  
fiber 2 in the Raman amplifier described in Claim 14 of the invention,  
a sufficient effect of amplification can be obtained although being  
25 a result of the previous studies.

[0059] Since, in the Raman amplifiers described in Claims 15 through  
17 of the invention, the optical fiber 2 exists as a part of a  
transmission fiber that causes signal light to propagate, it is  
possible to construct an amplifier in a transmission fiber as it  
30 is.

[0060]

Since, in the Raman amplifier described in Claim 18 of the  
invention, the optical fiber 2 exists as a Raman amplification fiber  
that is independent from a transmission fiber line for propagating  
35 signal lights and is inserted into the same transmission fiber,  
it is possible to easily utilize an optical fiber, which is suitable  
for Raman amplification, and a wavelength dispersion compensating

fiber for the optical fiber 2, and it is possible to construct a centralized type amplifier.

[0061]

5 Since, in the Raman amplifier described in Claim 19 of the invention, a loss of the optical fiber transmission line 8 is compensated by using a Raman amplifier, it is possible to obtain an optical relay having an action of the Raman amplifier described in Claims 1 through 18.

[0062]

10 In the optical relays described in Claims 20 and 24 of the invention, the residual pumping light of the Raman amplifier is made incident into the optical fiber transmission line 8, and a Raman amplification effect in the optical fiber transmission line 8 is utilized, wherein a part of the loss of the optical fiber  
15 transmission line 8 can be compensated.

[0063]

The optical relay described in Claim 21 of the invention is provided with a rare-earth doped fiber amplifier 9 before or after the Raman amplifier or at both sides thereof, wherein, since the  
20 loss of an optical fiber transmission line 8 is compensated by the Raman amplifier 9 and rare earth doped fiber amplifier 10, it is possible to obtain desired amplification characteristics suitable for various communications systems.

[0064]

25 In the optical relay described in Claims 22 and 26 of the invention, since the residual pumping light of the Raman amplifier is utilized as pumping light of the rare earth doped fiber amplifier 10, it is possible to reduce the number of semiconductor lasers used.

30 [0065]

Since the optical relay described in Claim 23 of the invention employs a dispersion compensating fiber for an optical fiber 2 for the Raman amplifier 9, the wavelength dispersion of the optical fiber transmission line 8 is compensated by the corresponding Raman  
35 amplifier 9, and a part or all of the loss in the optical fiber transmission line 8 and amplification fiber 2 can be compensated.

[0066]

The optical relay described in Claim 25 of the invention is provided with a rare earth doped fiber amplifier 10 before or after the Raman amplifier 9 or at both sides thereof. Since the Raman amplifier 9 and rare earth doped fiber amplifier 10 compensate a loss and wavelength dispersion in the optical fiber transmission line 8, it is possible to obtain desired amplification characteristics suitable for various communications systems.

[0067]

Also, in a construction, in which a Raman amplifier 9 and a rare earth doped fiber amplifier 10 are combined, in the present invention, a description is given of the case where an optical relay adaptive to various systems can be obtained, with reference to an example in which a DCF is used for an amplification fiber of the Raman amplifier 9. Fig. 17 shows an example of a design parameter of a prior art optical relay. G1 and G2 differ system by system. Also, it is unavoidable that the loss in the relay input and DCF fluctuates due to unevenness in the spacing of the relays and unevenness in the DCF. The fluctuation directly relates to a fluctuation in the gain of the EDFA, and the fluctuation in the gain results in deterioration of the flattening degree. Fig. 18 shows the relationship between the gain of EDFA and the flattening degree as an example. However, since optimizing of the flattening degree is carried out with the use band and average gain limited, if the average gain slips from the optimized point, the wavelength dependency of the gain fluctuates, and the flattening degree deteriorates. In order to avoid deterioration of the flattening degree, it is necessary to keep the gain of the EDFA fixed. In prior arts, a variable attenuator was used as a means for compensating losses in the input level and DCF. Fig. 19(a) shows an example in which, on the basis of a fluctuation in the input level, the amount of attenuation of the variable attenuator is adjusted, and the input level into the DCF is controlled to be fixed, and Fig. 19(b) shows an example in which, on the basis of a fluctuation in the loss in DCF, the amount of attenuation is adjusted, and the intermediate loss is controlled to be fixed. In either case, two EDFAs have fixed gain. However, since the method may add useless loss by the variable attenuator, it is disadvantageous in view of the noise



characteristics.

[0068]

In the invention, it is not necessary to design EDFA system by system while keeping the gain of the EDFA, by compensating a fluctuation in design parameters of a relay by a Raman amplification effect of the DCF, and the flattening degree does not sacrifice any noise characteristics, wherein it is possible to compensate unevenness in the spacing between the relays and unevenness of the DCF. Fig. 20 shows the design values of EDFA where the Raman amplification effect of DCF is applied to the relay specification shown in Fig. 17. By suitably selecting a Raman gain of the DCF, it is possible to carry out the characteristics of the EDFA, which are requested with respect to three types of specifications. In addition, as shown in Fig. 21(a) and Fig. 21(b), fluctuations in the input level and DCF loss can be compensated by varying the Raman gain without changing the gain of the EDFA. In any case, the Raman amplification gain is adjusted so that the output level of the DCF becomes constant, while keeping the gain of the EDFA fixed. Further, compensation of a loss in the DCF itself by Raman amplification relieves the deterioration of noise characteristics resulting from insertion of the DCF, which is unavoidable in the prior arts. Fig. 37 shows measured values of the amount of deterioration of a noise index where the DCF is inserted, and the amount of deterioration of a noise index where a Raman amplifier using the same DCF is inserted.

[0069]

Since the optical relays described in Claims 29 through 35 of the invention are provided with a Raman amplifier in which the wavelength of pumping light is single, it is possible to obtain optical relays, which have a narrow range of actuation and have a simple construction, having characteristics equivalent to the optical relays previously described other than the band width, in comparison with optical relays provided with a Raman amplifier that are excited by a plurality of wavelengths. Fig. 38 and Fig. 39 show measured examples of an optical relay which is provided with a Raman amplifier and is excited by a single wavelength, and an optical relay which is provided with a Raman amplifier and is excited by

a plurality of wavelengths.

[0070]

### ***Embodiments of the Invention***

#### 5 (Embodiment 1 of the Raman amplifier)

Fig. 1 shows a first embodiment of the Raman amplifier according to the invention that is composed of a signal light input fiber 12, an amplifier fiber (optical fiber) 2, a WDM coupler 13, a pumping light generating means 1, a monitor light distributing  
10 coupler 14, a monitor signal detection and LD control signal generating circuit 15, a signal light output fiber 16, and a polarization non-dependent isolator 25, wherein the monitor light distributing coupler 14 and monitor signal detection and LD control signal generating circuit 15 constitute an output light power  
15 controlling means 4.

[0071]

The pumping light generating means 1 is composed of Fabry-Perot type semiconductor lasers 3 ( $3_1$ ,  $3_2$ ,  $3_3$ , and  $3_4$ ), fiber gratings (external resonance units) 5 ( $5_1$ ,  $5_2$ ,  $5_3$ , and  $5_4$ ) for stabilizing  
20 a wavelength, polarization synthesizing couplers (polarization synthesizers) 6 ( $6_1$  and  $6_2$ ), and a WDM coupler 11. Herein, both the oscillation wavelength of the semiconductor lasers  $3_1$  and  $3_2$  and transmission wavelength of the fiber gratings  $5_1$  and  $5_2$  are the same wavelength  $\lambda_1$ . Both the center wavelength of the semiconductor  
25 lasers  $3_3$  and  $3_4$  and transmission wavelength of the fiber gratings  $5_3$  and  $5_4$  are the same wavelength  $\lambda_2$ . The oscillation wavelengths of the semiconductor lasers  $3_1$ ,  $3_2$ ,  $3_3$  and  $3_4$  are constructed so that the center wavelengths thereof are stabilized by actions of the fiber gratings  $5_1$ ,  $5_2$ ,  $5_3$  and  $5_4$  for stabilizing a wavelength. Also,  
30 the spacing between the wavelengths  $\lambda_1$  and  $\lambda_2$  is made into 6nm or more but 35nm or less.

[0072]

The pumping lights generated by the above-described semiconductor lasers 3 ( $3_1$ ,  $3_2$ ,  $3_3$ , and  $3_4$ ) are polarized and  
35 synthesized by the polarization synthesizing couplers 6 for the respective wavelengths  $\lambda_1$  and  $\lambda_2$ , and the output lights of the respective polarization synthesizing coupler 6 are synthesized by

the WDM coupler 11 and become output lights from the pumping light generating means 1. Connection was made between the semiconductor laser 3 and the polarization synthesizing coupler 6 by a polarization plane holding fiber 17, and the plane of polarization is constructed so that two different types of pumping lights are obtained. The output light of the pumping light generating means 1 is coupled to the amplification fiber 2 by the WDM coupler 13. On the other hand, the signal light (wavelength division synthesized light) is made incident into the amplification fiber 2 by the signal light input fiber 12, is synthesized with the pumping light of the pumping light generating means 1 by the same amplification fiber 2, and is Raman-amplified. Further, the same signal light passes through a WDM coupler 13, wherein a part thereof is bifurcated as a monitor light by a monitor light bifurcating coupler 14, and the remaining thereof is outputted to a signal light output fiber 16. The above-described monitor signal is monitored by a monitor signal detection and LD control signal generating circuit 15, and the same circuit 15 generates signals for controlling a drive current of the respective semiconductor lasers 3 so that a deviation in the gain in the signal wavelength band can be made small.

[0073]

A special fiber, for example, a fiber in which the non-linear refractive index  $n_2$  is  $3.5 \times 10^{-16}$  through  $20 \times 10^{-16}$  [m<sup>2</sup>/W] or more may be used as the above-described amplification fiber 2, and a signal input fiber 12 into which signal lights are made incident may be extended and may be used as the amplifier fiber 2 as it is. In addition, a RDF (Reverse Dispersion Fiber) whose dispersion is less than  $-20$  ps/nm per km is connected to SMF, and may be used as an amplification fiber, which is concurrently used as a transmission line. (Generally, since the RDF has a dispersion that is less than  $-20$  ps/nm, it is better that the RDF is used at a length equivalent to that of SMF through two times the length of SMF). In such a case, it is advantageous that the RDF and SMF are constructed so that the pumping light for Raman amplification propagates from the RDF toward the SMF. The Raman amplifier is constructed so that the amplification fiber 2 is connected to or inserted into a

transmission fiber (not illustrated) through which signal lights are transmitted, wherein a set of an amplification fiber 2, a pumping light generating means 1, a WDM coupler 13, a monitor bifurcating coupler 14, a monitor signal detection and LD control signal generating circuit 15 is incorporated to construct a centralized Raman amplifier.

[0074]

Fig. 22 shows measurement of output spectra in the Raman amplifier of Fig. 1. The pumping light wavelengths  $\lambda_1$  and  $\lambda_2$  are 1435nm and 1465nm, and the signal lights are such that eight waves are inputted with the same spacing between -20dBm/ch 1540nm through 1560nm. The amplification fiber is approximately 6km long dispersion compensating fiber, wherein a deviation between the channels is kept 0.5dB or less, and the power of the pumping lights is adjusted so that a loss in the dispersion compensating fiber can be compensated.

[0075]

(Embodiment 2 of the Raman amplifier)

Fig. 2 shows a second embodiment of the Raman amplifier of the invention, which is constructed so that pumping lights from the pumping light generating means 1 are caused to advance through an amplification fiber 2 in the same direction as the signal light. In detail, a WDM coupler 13 is provided at the forward end side of the amplification fiber 2, and the pumping light from the pumping light generating means 1 is transmitted from the forward end side (input side) of the amplification fiber 2 to the rear end side (output side) thereof through the WDM coupler 13. With this construction, since signals are amplified before any attenuation occurs, it has been publicly known that, in comparison with the construction of the first embodiment, the noise characteristics of signal light are better. Also, it has been publicly known that, in comparison with the construction of the first embodiment, the gain is small.

[0076]

(Embodiment 3 of the Raman amplifier)

Fig. 3 shows a third embodiment of the Raman amplifier of the invention, which is constructed so that pumping lights from

the pumping light generating means 1 is caused to advance bidirectionally through an amplification fiber 2. In detail, a WDM coupler 13 is provided at the forward end side and the rearward end side of the amplification amplifier 2 separately, and the pumping light from the pumping light generating means 1, which are grouped into two, are respectively coupled to the amplification fiber 2 through the WDM coupler 13, wherein the pumping light inputted into the WDM coupler 13 at the forward end side is caused to advance to the rearward end side of the amplification fiber 2, and the pumping lights inputted into the WDM coupler 13 at the rearward end side are caused to advance to the forward end side of the amplification fiber 2.

[0077]

Either of the center wavelength of the semiconductor lasers  $3_1$  and  $3_2$  belonging to the first group "A" of the above-described pumping light generating means 1 and that of the semiconductor lasers  $3_5$  and  $3_6$  belonging thereto is the same, and either of the center wavelength of the semiconductor lasers  $3_3$  and  $3_4$  belonging to the first group "A" of the above-described pumping light generating means 1 and that of the semiconductor lasers  $3_7$  and  $3_8$  belonging to the second group "B" is the same. In addition, the fiber gratings 51 through 58 are matched to the center wavelength of the semiconductor lasers 3 to which each thereof is connected.

[0078]

(Embodiment 4 of the Raman amplifier)

In the embodiment shown in Fig. 3,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ , and  $\lambda_4$  may be, respectively, constituted as the wavelength adjacent to each other where it is assumed that the center wavelength of the semiconductor lasers  $3_1$  and  $3_2$  belonging to the first group "A" is  $\lambda_1$ , the center wavelength of the semiconductor lasers  $3_3$  and  $3_4$  belonging to the first group "A" is  $\lambda_3$ , the center wavelength of the semiconductor lasers  $3_5$  and  $3_6$  belonging to the second group "B" is  $\lambda_2$ , and the center wavelength of the semiconductor lasers  $3_7$  and  $3_8$  belonging to the second group "B" is  $\lambda_4$ . In this case, the spacing of the center wavelength is 10nm or more but 30nm or less, wherein a difference between the maximum center wavelength  $\lambda_4$  and the minimum center wavelength  $\lambda_1$  is 100nm or less. With such a construction, it is

possible to secure allowance in the spacing between the wavelengths of pumping lights synthesized in the same group, and the performance that is requested for the WDM coupler 4 can be slackened.

[0079]

5 (Embodiment 5 of the Raman amplifier)

Fig. 40 shows a fifth embodiment of a Raman amplifier according to the invention. The embodiment is such that some suitable ones are selected from the Raman amplifier 9 described in the respective above-described embodiments and these are connected in multilayers. By adequately selecting Raman amplifiers whose features differ from each other, in compliance with the desired amplification characteristics and noise characteristics, it is possible to obtain characteristics that cannot be obtained by a single Raman amplifier.

15 [0080]

In the respective above-described embodiments, the output light power controlling means 4 may be constructed as shown in Fig. 4 or Fig. 5. The construction shown in Fig. 4 is such that a monitor signal detection and LD control signal generating circuit consisting of a wavelength divider 18, a photo-electric converting means 19 such as a photo diode, etc., and an LD control circuit 20 is connected to a monitor light bifurcating coupler 14 shown in Fig. 1, Fig. 2, or Fig. 3. The wavelength divider 18 divides output light bifurcated by the monitor light bifurcating coupler 14 into lights having a plurality of wavelengths. In this case, the wavelength divider 18 divides light in the vicinity of the maximum amplification wavelength (a wavelength obtained by adding 100nm to the wavelength of a pumping light) brought about by individual pumping lights, and in detail, divides a light of a wavelength in the vicinity of 1530nm and 1560nm if the pumping wavelength is 1430nm and 1460nm. The photo-electric converting means 19 converts a light of a wavelength received to electric signals, wherein the output voltage varies in response to the intensity of a light receiving level. The LD control circuit 20 varies the drive current of the semiconductor lasers 3 in response to the output voltage from the photo-electric converting means 19, wherein the LD control circuit 20 processes and calculates the

output voltage from the photo-electric converting means 19 and controls the semiconductor lasers 3 so that the light power of the respective above-described wavelength lights are matched to each other. That is, the output light power controlling means 4 solves  
5 the wavelength dependency of a Raman gain and functions to flatten the gain.

[0081]

The construction shown in Fig. 5 is such that a monitor signal detection and LD control signal generating circuit 15 consisting of a bifurcating coupler 21, a band-pass filter 22, a photo-electric converting means 19 such as a photo diode, etc., and an LD control circuit 20 is connected to the monitor light bifurcating coupler 14 shown in Fig. 1, Fig. 2 or Fig. 3. The bifurcating coupler 21 bifurcates the output light, which is bifurcated by the monitor  
15 light bifurcating coupler 14, into the same number as the number of pumping lights. The band-pass filter 22 has transmission center wavelengths differing from each other. In this case, the filter 22 transmits light in the vicinity of the maximum amplification wavelength (a wavelength obtained by adding 100nm to the wavelength  
20 of a pumping light) brought about by individual pumping lights, and in detail, transmits a light of a wavelength in the vicinity of 1530nm and 1560nm if the pumping wavelength is 1430nm and 1460nm. The photo-electric converting means 19 converts a light of a wavelength received to electric signals, wherein the output voltage  
25 varies in response to the intensity of a light receiving level. The LD control circuit 20 varies the drive current of the semiconductor lasers 3 in response to the output voltage from the photo-electric converting means 19, wherein the LD control circuit 20 processes and calculates the output voltage from the photo-  
30 electric converting means 19 and controls the semiconductor lasers 3 so that the light power of the respective above-described wavelength lights are matched to each other. That is, the output light power controlling means 4 solves the wavelength dependency of a Raman gain and functions to flatten the gain. Fig. 4 and Fig.  
35 5 show a construction that monitors an output light as shown in Fig. 27 and controls the pumping light generating means 1. However, the construction may be constituted so as to control the pumping

light generating means 1 by monitoring the input light as shown in Fig. 26, or so as to control the pumping light generating means 1 by monitoring both output light and input as shown in Fig. 28.  
[0082]

5           In the Raman amplifiers according to the respective above-described construction, a polarization plane turning means 7 that turns the plane of polarization of pumping light by 90 degrees as shown in Fig. 6(a) and Fig. 6(b) is provided instead of synthesizing the pumping light by a polarization synthesizing  
10   coupler 6, so that a plurality of pumping lights generated by the pumping light generating means 1 and pumping lights whose plane of polarization is orthogonal thereto exist in the amplification fiber 2 at the same time. Fig. 6(a) shows a Raman amplifier constructed so that a Faraday rotor 31 and an entire-reflection  
15   mirror 32 are provided at one end of the amplification fiber 2, and the plane of polarization of a pumping light propagated to the amplification fiber 2 is turned by 90 degrees, and again the pumping light is returned to the amplification fiber 2. In the same drawing, no means for picking up a signal light, which is propagated to the  
20   amplification fiber 2 and Raman-amplified, from the same fiber 2 is shown. Fig. 6(b) shows a Raman amplifier constructed so that PBS 33 and a polarization plane holding fiber 34 are provided at one end of the amplification fiber 2, the plane of polarization of the pumping light outputted from one end of the amplification fiber  
25   2 is turned by 90 degrees by the polarization plane holding fiber 34 having the main axis connected with the same twisted by 90 degrees, and the pumping light is again inputted into one end of the amplification fiber 2 through the PBS 33.

[0083]

30   (Embodiment 1 of the optical relay)

Fig. 7 shows a first embodiment of an optical relay constructed by using a Raman amplifier according to the invention, and is an example of an optical relay that is inserted into an optical fiber transmission line 8 and compensates a loss in the same optical  
35   fiber transmission line 8. The optical relay is such that a rare earth doped fiber amplifier 10 (hereinafter called an "EDFA") is connected to a part behind the Raman amplifier shown in Fig. 1,



Fig. 2 and Fig. 3, and is such that a signal light to be transmitted through the optical fiber transmission line 8 is inputted into the Raman amplifier 9 and amplified therein and is further inputted in the EDFA 10 and amplified therein, and finally outputted to the optical fiber transmission line 8. The gain may be adjusted at the Raman amplifier 9 side or may be adjusted at the EDFA 10 side, or may be adjusted at both thereof, wherein the loss in the optical fiber transmission 8 is devised so as to be compensated as a whole. In addition, by combining differences between the wavelength dependency of the gain that the EDFA 10 has and the wavelength dependency of the Raman amplifier 9, it is possible to reduce the wavelength dependency of the gain, which the EDFA 10 has, by the wavelength dependency of the Raman amplifier 9.

[0084]

(Embodiment 2 of the optical relay)

Fig. 8 shows a second embodiment of the optical relay that is constructed by using the Raman amplifier according to the invention. The optical relay shown in Fig. 7 is such that an EDFA 10 is provided before the Raman amplifier 9.

[0085]

(Embodiment 3 of the optical relay)

Fig. 9 shows a third embodiment of the optical relay that is constructed by using the Raman amplifier according to the invention, and is such that a Raman amplifier 9, in which a dispersion compensating fiber (DCF) is used between two EDFAs 10 as an amplification fiber 2. A bifurcating coupler 23 that bifurcates output light from the Raman amplifier 9 and a monitor signal detecting and LD control signal generating circuit 24 that monitors the bifurcated light and controls the gain of the Raman amplifier 9 are provided between the Raman amplifier 9 and the EDFA 10 therebehind. The monitor signal detection and LD control signal generating circuit 24 is a circuit that is able to keep the output power of the Raman amplifier 9 at an appointed value. Also, where the Raman amplifier 9 itself is provided with an output light power controlling means 4 shown in Fig. 4 and Fig. 5, the power of the pumping light is controlled so that the power of the output light becomes an appointed value and at the same time, a deviation in

level between a plurality of output signals can be decreased.  
[0086]

In the optical relay shown in Fig. 9, there is no case where the output light level of the Raman amplifier 9, that is, the input  
5 light level into the second EDFA 10 is influenced by a loss in the DCF and an output level of the first EDFA 10, and the level is kept on a fixed value. This guarantees that, wherein the output of the relay is prescribed, the gain of the second EDFA 10 is kept on a fixed level. Therefore, it is possible to prevent the flattening  
10 of the gain of the second EDFA 10, resulting from a fluctuation, etc., in the loss of the DCF, from deteriorating. Further, if the first EDFA 10 is controlled so as to become fixed, a fluctuation in input into the first EDFA 10 is compensated by a fluctuation in the gain of the Raman amplifier 9. That is, the adjustment of  
15 the relay gain can be carried out by only the gain of the Raman amplifier 9, wherein it is possible to completely prevent the flattening degree due to the fluctuation in the gain of the EDFA 10 from deteriorating.

[0087]

20 (Embodiment 4 of the optical relay)

Fig. 10 is an optical relay that is provided with a controlling means for monitoring the optical level and adjusting the gain of the Raman amplifier 9 between the first EDFA 10 and the Raman amplifier 9. By using this, the pumping light can be  
25 controlled so that a difference in level between the input and output of the Raman amplifier 9 can be kept on a fixed level, whereby unevenness in the loss of the DCF can be compensated.

[0088]

(Embodiment 5 of the optical relay)

30 In the above-described embodiment, Fig. 11 is an example in which the gain flattening and monitoring mechanism secured in the Raman amplifier 9 is shifted to the output end of the relay and is used as a monitor to flatten the gain of the entire relay. In this case, the first EDFA 10 and EDFA 10 may be of either of fixed  
35 gain control or fixed output control. The power of the respective pumping lights is individually controlled so that a deviation in level between the output signals of the relay output.

[0089]

(Embodiment 6 of the optical relay)

By using a dispersion compensating fiber for an amplification fiber 2 of the Raman amplifier constructed as shown in Fig. 1 through Fig. 3, the optical relay according to the invention may be constructed so as to compensate a wavelength dispersion of the optical fiber transmission line 8 and compensates a part or all of the loss in the optical fiber transmission line 8 and the amplification fiber 2.

[0090]

(Embodiment 7 of the optical relay)

In the respective embodiments of the above-described optical relay, it is possible to construct an optical relay provided with a Raman amplifier 9 employing a pumping light generating means 1 as shown in Fig. 41 through Fig. 44.

[0091]

(Embodiment 8 of the optical relay)

A WDM coupler 13 is inserted halfway of the amplification fiber 2 of the Raman amplifier 9 as shown in Fig. 29 through Fig. 32, and the residual pumping light that is propagated to the amplification fiber 2 and is from the pumping light generating means 1 is made incident into an optical fiber transmission line 8 through a WDM coupler 27 in the optical fiber transmission line at the input side or the output side of the Raman amplifier 9, whereby it is possible to produce a Raman gain in the optical transmission line 8. In addition, in Fig. 29 through Fig. 32, 26 denotes an optical isolator.

[0092]

(Embodiment 9 of the optical relay)

As shown in Fig. 33 through Fig. 36, where the optical relay is composed of a Raman amplifier 9 and an EDFA 10, a WDM coupler 13 is inserted halfway of the amplification fiber 2 of the Raman amplifier 9, and the residual pumping light that is propagated to the amplification fiber 2 and is from the pumping light generating means 1 is made incident into the EDFA 10, thereby making the same into a pumping light/ an auxiliary pumping light of the same EDFA 10. Also, in Fig. 33 through Fig. 36, 26 denotes an optical isolator.

### ***Effects of the Invention***

As described above, in the Raman amplifier according to the invention, by selecting a wavelength of a pumping light source so that the spacing of the center wavelength is 6nm or more but 35nm or less and a difference between the maximum value of the center wavelength and the minimum value thereof is 100nm or less, it is possible to provide an optical amplifier that has less dependency on a wavelength in connection with a loss to such a degree that no gain flattening filter is used, and is able to keep the flattening degree even if the gain changes. Also, it is possible to apply the optical amplifier as an optical relay that compensates a loss in a transmission line and dispersion in wavelength. In a relay constructed so as to be combined with an EDFA, the relay can suppress a fluctuation in gain of the EDFA due to a fluctuation in input of the relay and a fluctuation in loss of a DCF, and the flattening of gain can be prevented from deteriorating, wherein the relay can be applied to various applications.

### ***Brief Description of the Drawings***

[Fig. 1] is a block diagram showing a first embodiment of a Raman amplifier according to the invention;

[Fig. 2] is a block diagram showing a second embodiment of a Raman amplifier according to the invention;

[Fig. 3] is a block diagram showing a third embodiment of a Raman amplifier according to the invention;

[Fig. 4] is a block diagram showing a first example of an output light power controlling means in a Raman amplifier according to the invention;

[Fig. 5] is a block diagram showing a second example of an output light power controlling means in a Raman amplifier according to the invention;

[Fig. 6] (a) and (b) are block diagrams showing a different example of a polarization plane turning means in a Raman amplifier according to the invention;

[Fig. 7] is a block diagram of a first embodiment of an optical

relay according to the invention;

[Fig. 8] is a block diagram of a second embodiment of an optical relay according to the invention;

5 [Fig. 9] is a block diagram of a third embodiment of an optical relay according to the invention;

[Fig. 10] is a block diagram of a fourth embodiment of an optical relay according to the invention;

[Fig. 11] is a block diagram of a fifth embodiment of an optical relay according to the invention;

10 [Fig. 12] is a view explaining the reason why the spacing between wavelengths of a pumping light is made into 6nm or more;

[Fig. 13] (a) and (b) are views explaining the reason why the spacing between wavelengths of a pumping light is made into 35nm or less;

15 [Fig. 14] is a view explaining the reason why a difference between the maximum wavelength of the pumping light and the minimum value thereof is made into 100nm or less;

[Fig. 15] is a view explaining an example of a wavelength array of a pumping light in the bi-directional pumping;

20 [Fig. 16] (a) is a view explaining a band gain where the pumping light power is fixed, and (b) is a view explaining a state where the band gain is flattened by controlling the pumping light power.

[Fig. 17] (a) and (b) are views explaining characteristics  
25 regarding a design of an optical relay;

[Fig. 18] is a view explaining the relationship between a fluctuation in gain of an EDFA and deterioration in the flattening degree;

30 [Fig. 19] (a) is a view showing a state of compensating a fluctuation in input level by a variable attenuator; and (b) is a view explaining a state of compensating a fluctuation in DCF loss by a variable attenuator;

[Fig. 20] (a) and (b) are views showing characteristics  
35 regarding a design of an optical relay in which a DCF Raman amplification effect is utilized;

[Fig. 21] (a) is a view explaining a state of compensating a fluctuation in input level by a Raman amplification effect, and

(b) is a view explaining a state of compensating a fluctuation in DCF loss by the Raman amplification effect;

[Fig. 22] is a view showing a different example of output spectra by the Raman amplifier;

5 [Fig. 23] is a view showing wavelength dependency of gain by EDFA;

[Fig. 24] is a view explaining a fluctuation in gain by the EDFA;

10 [Fig. 25] is a view showing wavelength dependency in gain by the Raman amplification;

[Fig. 26] is a block diagram showing a method for monitoring input light and controlling output light power;

[Fig. 27] is a block diagram showing a method for monitoring output light and controlling the output light power;

15 [Fig. 28] is a block diagram showing a method for monitoring input light and output light and controlling the output light power;

[Fig. 29] is a block diagram showing a first example of a method for transmitting the residual pumping light of the Raman amplifier to an optical fiber transmission line and securing a Raman gain;

20 [Fig. 30] is a block diagram showing a second example of a method for transmitting the residual pumping light of the Raman amplifier to an optical fiber transmission line and securing a Raman gain;

25 [Fig. 31] is a block diagram showing a third example of a method for transmitting the residual pumping light of the Raman amplifier to an optical fiber transmission line and securing a Raman gain;

30 [Fig. 32] is a block diagram showing a fourth example of a method for transmitting the residual pumping light of the Raman amplifier to an optical fiber transmission line and securing a Raman gain;

35 [Fig. 33] is a block diagram showing a first example of a method for utilizing the residual pumping light of the Raman amplifier as pumping light of the EDFA;

[Fig. 34] is a block diagram showing a second example of a method for utilizing the residual pumping light of the Raman

amplifier as pumping light of the EDFA;

[Fig. 35] is a block diagram showing a third example of a method for utilizing the residual pumping light of the Raman amplifier as pumping light of the EDFA;

5 [Fig. 36] is a block diagram showing a fourth example of a method for utilizing the residual pumping light of the Raman amplifier as pumping light of the EDFA;

[Fig. 37] is a view explaining deterioration of a noise index by insertion of a dispersion compensating fiber;

10 [Fig. 38] is a view explaining the number of pumping wavelengths of the Raman amplifier and characteristics of an optical relay;

[Fig. 39] is a view explaining the number of pumping wavelengths of the Raman amplifier and characteristics of an  
15 optical relay;

[Fig. 40] is a block diagram of an optical relay in which a plurality of Raman amplifiers are connected in multilayers;

[Fig. 41] is a block diagram showing one example of a pumping light generating means having a single pumping light source;

20 [Fig. 42] is a block diagram showing another example of a pumping light generating means having a single pumping light source;

[Fig. 43] is a block diagram showing one example of a pumping light generating means having two pumping light sources;

25 [Fig. 44] is a block diagram showing another example of a pumping light generating means having two pumping light sources;

[Fig. 45] is a block diagram of a Raman amplifier in which a dispersion compensating fiber is made into an amplification fiber;

30 [Fig. 46] is a block diagram showing one example of the conventional optical relay; and

[Fig. 47] is an optical level diagram in the optical relay in Fig. 46.

35 ***Description of Reference Numbers***

- 1 Pumping light generating means
- 2 Optical fiber

- 3 Fabry-Perot type semiconductor laser
- 4 Output light power controlling means
- 5 External resonance unit
- 6 Polarization multiplier
- 5 7 Polarization plane turning means
- 8 Optical fiber transmission line
- 9 Raman amplifier
- 10 Rare earth doped fiber amplifier



図面中の訳語

Page 13

Fig. 1

Signals

5 Signals

Pumping light

A part of the signals

A majority of the signals

Fig. 7

10 Fig. 41

Fig. 42

Page 14

Fig. 2

Signals

15 Signals

Pumping light

A part of the signals

A majority of the signals

Fig. 3

20 Signals

Signals

Pumping light

Pumping light

A part of the signals

25 A majority of the signals

Fig. 8

Fig. 9

Input

9 Raman amplifier

30 LD control signal

Output

Fig. 10

Input

LD control signal

35 9 Raman amplifier

Output

Page 15

Fig. 4  
 Amplification side  
 Output side  
 To LD 3

5 Fig. 5  
 Amplification side  
 Output side  
 To LD 3  
 Fig. 6(a) and (b)

10 Fig. 11  
 Input  
 9 Raman amplifier  
 10 EDFA  
 Output

15 Fig. 12  
 Spacing between the minimum wavelengths of pumping light source:  
 6nm  
 Band width of pumping light source: 3nm  
 Band width of pumping light source: 3nm

20 Width of a band where a loss in the WDM coupler is large: 3nm  
 Page 16  
 Fig. 13 (a)  
 Pumping power  
 35nm or more

25 Wavelength  
 Fig. 13 (b)  
 Gain  
 35nm or more  
 Wavelength

30 Fig. 26  
 9 Raman amplifier  
 Pumping light control signal  
 Fig. 14  
 Pumping light

35 Approximately 13THz  
 Gain  
 To prevent overlap;

Fig. 15

The center spacing is 6nm or more but 35nm or less

Fig. 28

9 Raman amplifier

5 1 Pumping light generating means

Fig. 43

Fig. 27

9 Raman amplifiers

Pumping light control signal

10 Page 17

Fig. 16(a)

Power

Fixed control of pumping light

Adequate wavelength spacing

15 Gain

Wavelength

Fig. 16(b)

Signal power

Gain flattening control by output signal monitor

20 Set value

Power

(The wavelength spacing is narrower than the optimal value)

Fig. 17(a)

Relay specifications

25 Relay input

Relay output

DCF sacrifice selling

Fig. 17(b)

EDFA design example

30 Amplifier 1 gain

Amplifier 2 gain

Relay gain

Fig. 18

Relationship between a fluctuation in gain of the EDFA and

35 deterioration of flattening degree thereof

Mean gain increase

Flattening degree deterioration

Ideal EDFA characteristics

Mean gain decrease

Flattening degree deterioration

Gain

5 Wavelength

Fig. 19

(a) Compensation of a fluctuation in input level by a variable attenuator

Light level

10 Amount of attenuation

Level fixed

Gain fixed

Adjustment is made in advance so that the input value of DCF becomes fixed where  $P_{in} + \Delta$ .

15 Amplifier 1

Attenuator

DCF

Amplifier 2

(b) Compensation of a fluctuation in DCF loss by a variable

20 attenuator

Light level

Total loss fixed

Adjustment is made in advance so that the input value of the DCF becomes fixed where the input value of the DCF is  $LD + \Delta$ .

25 Level fixed

Page 18

Fig. 20

(a)

Specifications

30 Relay input

Relay output

DCF sacrifice selling

(b)

Amplifier 1

35 Amplifier 2

Raman gain

Relay gain

Fig. 21

(a) Compensation of a fluctuation in input level by the Raman amplification effect

Raman gain

5 To be fixed when the output end of DCF is Pin+ (at the DCF output end)

Amplifier 1

DCF

Amplifier 2

10 (b)

Compensation of a fluctuation in DCF loss by the Raman amplification effect

Amplifier 1

DCF

15 Amplifier 2

Fig. 22

Fig. 44

Page 19

Fig. 23

20 Fig. 24

Mean gains

Wavelength

Fig. 40

8 Transmission line

25 9 Raman amplifier

9 Raman amplifier

9 Raman amplifier

8 Transmission line

Page 20

30 Fig. 29

9 Raman amplifier

8 transmission line

Signal light

Residual pumping light

35 8 Transmission line

Fig. 30

9 Raman amplifier

8      Transmission line  
 8      Transmission line  
 Residual pumping light  
 Page 21  
 5      9      Raman amplifier  
       8      Transmission line  
 Residual pumping light  
 Fig. 32  
       9      Raman amplifier  
 10     8      transmission line  
 Signal light  
 Residual pumping light  
 Fig. 33  
       9      Raman amplifier  
 15     10     Rare earth doped fiber amplifier  
 Residual pumping light  
 Page 22  
       9      Raman amplifier  
       10     Rare earth doped fiber amplifier  
 20     Residual pumping light  
 Fig. 35  
       9      Raman amplifier  
       10     Rare earth doped fiber amplifier  
 Residual pumping light  
 25     Fig. 36  
       9      Raman amplifier  
       10     Rare earth doped fiber amplifier  
 Residual pumping light  
 Page 23  
 30     Fig. 37  
 Deterioration of noise index due to insertion of dispersion  
 compensating fiber  
       Without Raman amplification  
       With Raman amplification  
 35     Amount of deterioration of noise index  
 Wavelength  
 Fig. 38

- Number of pumping wavelengths of Raman amplifier and characteristics of relay
- Plural wavelength pumping
  - Single wavelength pumping
- 5 Relay gain
- Wavelength
- Fig. 45
- Fig. 46
- Transmission line
- 10 Relay input
- Transmission line
- Relay output
- Page 24
- Fig. 39
- 15 Number of pumping wavelengths of Raman amplifier and characteristics of relay
- Plural wavelength pumping
  - Single wavelength pumping
- Noise index of relay
- 20 Wavelength
- Fig. 47
- Light level
- Relay input end
- DCF input end
- 25 DCF output end
- Relay output end

**This Page Blank (uspto)**



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**

This Page Blank (uspto)